

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Promísení svarového kovu spoje
u obloukových technologií svařování**

**Weld pool dilution during arc
welding**

Student:

David Škrobánek

Osobní číslo

SKR0118

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **David Škrobánek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Promísení svarového kovu spoje u obloukových technologií svařování**
Weld Pool Dilution During Arc Welding
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii použitých technologií a použitých materiálů.
2. Proved'te rozbor stanovení promísení u obloukových metod svařování.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření vlivu svařovacích parametrů na promísení.
4. Proved'te vyhodnocení a diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
NOURI, Meisam; ABDOLLAH-ZADEH, Amir; MALEK, F. Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding. *Journal of materials science & technology*. 2007, 23.6: 817.
PICKIN, Craig Graeme; WILLIAMS, Stewart W.; LUNT, M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, 211.3: 496-502.
HUNT, A. C.; KLUKEN, A. O.; EDWARDS, G. R. Heat input and dilution effects in microalloyed steel weld metals. *Welding Journal*. 1994, 73: 9-s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 20.12.2019
Datum odevzdání: 18.05.2020

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....

Podpis autora práce

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŠKROBÁNEK, David. *Promísení svarového kovu spoje u obloukových technologií*. Ostrava, 2020. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce Ochodek V.

Bakalářská práce se zaměřuje na výpočet promísení svarového kovu spoje při různých svařovacích parametrech u obloukových technologií svařování. Teoretická část se zabývá studií a výpočtem promísení, stručným přehledem obloukových technologií a studií použitého materiálu. Experimentální část se zabývá měřením návarů, zjišťováním ploch převýšení a protavení a výpočtem promísení. Bylo experimentálně stanoveno promísení pro technologie 111 a 135 při svařování uhlíkových ocelí.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

ŠKROBÁNEK, D. *Weld pool dilution during arc technologies*. Ostrava, 2020. Bachelor thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology. Thesis head: Ing. Vladislav Ochodek.

Bachelor thesis is focusing on the calculation of the weld metal dilution of the join at different welding parameters in arc welding technologies. The theoretical part deals with the study and calculation of dilution a brief overview of arc technologies and studies of the used material. The experimental part deals with the measurement of welds determination of areas by cant, re-melting and calculation of dilution. The dilution was determined experimentally for technologies 111 and 135 in the welding of carbon steels.

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	
135	obloukové svařování tavící se elektrodou aktivním plynu	
141	obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu	
A	kyselé obal elektrody	
A	tažnost	[%]
a	šířka návaru	[mm]
B	bazický obal elektrody	
b	délka svarové lázně	[mm]
C	celulózový obal elektrody	
c	hloubka návaru	[mm]
Ce	uhlíkový ekvivalent	[%]
D	promísení	[%]
d	průměr	[mm]
E	modul pružnosti	[GPa]
h	výška TOO	[mm]
I	elektrický proud	[A]
J	proudová hustota	[A · mm ⁻²]
K _v	nárazová práce	[J]
l	délka návaru	[mm]

p	výška převýšení	[mm]
PA	poloha vodorovná shora	
PG	poloha svisle dolů	
Pn	plocha převýšení	[mm ²]
Ph	plocha protavení	[mm ²]
Q	tepelný výkon	[kJ · mm ⁻¹]
q	teplotní vodivost	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
R	rutilový obal elektrody	
RA	rutil kyselý obal elektrody	
RB	rutil bazický obal elektrody	
RC	rutil – celulózová obal elektrody	
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
RP	tlustostěnný rutilový obal elektrody	
T	teplota	[°C]
t	celková výška návaru	[mm]
t	tloušťka návaru	[mm]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
U	napětí	[V]
v _s	rychlost svařování	[cm · min ⁻¹]
z	plocha závaru závar	[mm ²]

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	5
Úvod.....	9
1. Promísení svarového kovu spoje u obloukových technologií svařování	10
1.1 Svarový kov	10
1.2 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)	12
1.3 Konkrétní výpočty promísení	14
2. Svařování.....	16
2.1 Obloukové svařování	16
2.1 Svařování ruční obalenou elektrodou	17
2.2 Svařování metodou MIG/MAG	18
2.3 Svařování metodou WIG (TIG).....	20
3. Charakteristika základního materiálu	22
3.1 Ocel S355	22
3.1.1 Chemické složení.....	22
3.1.2 Mechanické vlastnosti	24
3.1.3 Technologické vlastnosti a použití	25
4. Experimentální část.....	26
4.1 Postup měření	26
4.2 Výsledek metody 111	30
4.3 Výsledky metody 135	35
5. Vyhodnocení a diskuse dosažených výsledků	40
5.1. Srovnání metod.....	40
5.2 Možné odchylky a uplatnění.....	41
6. Závěr.....	42
Seznam použité literatury.....	44
Seznam obrázků	47

Seznam příloh	47
Přílohy	49

Úvod

Svařování je vysoce produktivní výrobní technologie. Její uplatnění nalezneme téměř ve všech průmyslových oblastech, neboť bez svařování není možno realizovat řadu konstrukcí nebo jen s řadou potíží a vysokých nákladů. Tím pádem stále narůstají požadavky na kvalitu a životnost provedených svarových spojů.

Při tavném svařování dojde působením tepla k natavení vytvořených svarových ploch k promísení základního kovu s roztaveným přídavným materiálem. Při svařování kořenové části svarového spoje je promísení vyšší než při svařování výplňové části. Tato část spoje nám výrazně ovlivňuje výslednou strukturu, které vzniká ve sváru (austenit, martenzit, ferit a jejich společné struktury).

Promísení je procentuální hodnota podílu nataveného základního materiálu ve svarovém kovu. Při obloukových technologiích svařování se tato hodnota udává číselné rozmezí – například u ručního obloukového svařování je stupeň promísení od 10 do 40 %, automat pod tavidlem až 85 %. Tato hodnota se dále používá při predikci výsledné svarové struktury u heterogenního spoje nebo v různých parametrických rovnicích.

Nejznámější diagram pro predikci výsledné struktury se Schaefflerův diagram nebo De Langův diagram. V těchto diagramech se využívá stupeň promísení, který bohužel není přesně znám a jeho hodnota může lehce ovlivnit výslednou strukturu.

Tato bakalářská práce bude zaměřena na stanovení stupně promísení v závislosti na svařovacích parametrech. V práci se vypracovaná studie svarového kovu, promísení použitých materiálů v experimentální části a obloukových technologií.

1. Promísení svarového kovu spoje u obloukových technologií svařování

1.1 Svarový kov

Svarový kov vzniká tavením základního a přídavného materiálu tento proces vzniku je turbulentní. Při procesu tavného svařování probíhá natavování svarových ploch a přídavného materiálu vlivem působení koncentrovaného zdroje tepla. Svarový kov spoje je kov odtavený z přídavného materiálu a promísený se základním materiálem. Promísení D je podíl nataveného základního materiálu ve svarovém kovu. Při svařování kořenové vrstvy vzniká vyšší stupeň promísení než u výplňové části svarového spoje. Stupeň promísení u ručního obloukového svařování (111) se pochybuje od 10 až do 40 %. U automatu pod tavidlem (121) se hodnoty pohybují až k 85 % a při elektrostruskovém svařování až 90 % [13]. Při použití svařování elektronovým paprskem je svarový kov tvořen pouze nataveným základním materiálem.

Velikost a tvar svarové lázně (tedy její objem) je přímo úměrný tepelnému výkonu svařování Q . Mezi geometrické faktory svarové lázně patří:

- šířka svarové lázně a
- hloubka závaru c

Tyto faktory nejvíce ovlivňují hodnoty intenzity svařovacího proudu I a svařovacího napětí U . Vnější koeficientem tvaru svaru označujeme poloměr šířky a hloubky svarového kovu. Dalším faktorem ovlivňující tvar svarové lázně je rychlost svařování v .

Výpočet tepelného výkonu svařování

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (1)$$

Protože tavné svařování vyžaduje, aby část každého základního kovu nebo substrátu zahrnutá ve společné tavenině spolu s plnivem, byla heterogenní plniva nevyhnutelně promísená základním kovem. [1].

Stupeň promísení závisí na:

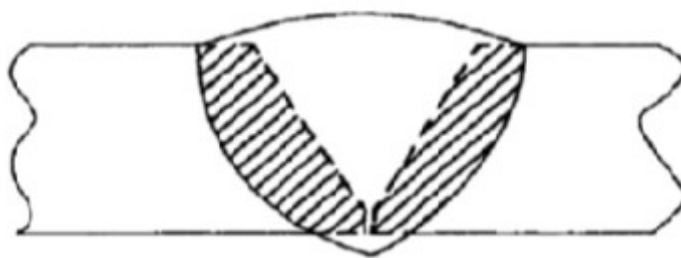
- 1) Typu přípravy spojů a okraje spojů,

- 2) Svařovacím procesu a parametrech procesu (včetně režimu provozního proudu),
- 3) Nesouladu mezi přídavným materiálem a základním kovem.

Obecně je promísení vyjádřeno v procentech a definováno jako:

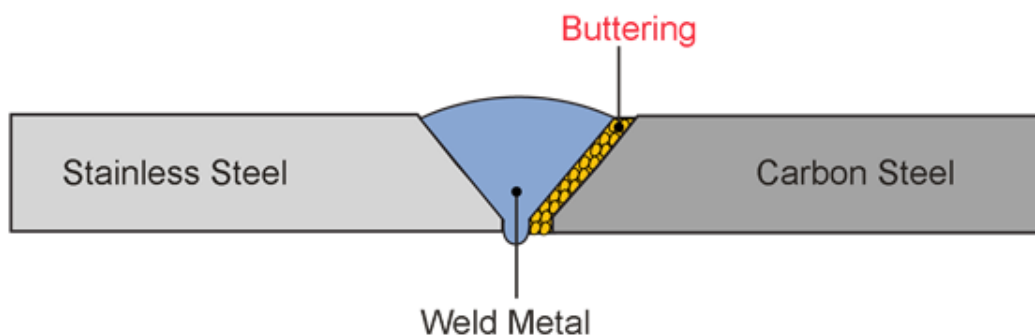
$$D = \frac{\text{hmotnost roztavených základních kovů}}{\text{celková hmotnost roztaveného kovu}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Hmotnost v tomto vztahu může být považována za relativní oblasti reprezentativního průřezu svaru, jak je znázorněno na obrázku níže.



Obrázek 1 - Ukázka promísené oblasti svarového kovu [2]

Technika svařování může také změnit stupeň promísení. Série překrývajících se jemných strunových kuliček (vyrobené s nízkým tepelným příkonem) vedou k menšímu promísení než u méně těžkých průchodů (vyrobených s vysokým tepelným vstupem) ve vícenásobných svarech. Zvláštní technika používaná k minimalizaci promísení se nazývá „buttering“. Buttering je varianta povrchového svařování, ve kterém je svarový kov nanesen na jednom nebo více površích za účelem poskytnutí metalurgicky kompatibilního svarového kovu pro následné dokončení svaru. Vytvoří se tzv. přechodová vrstva – bariéra proti promísení. Využívá se u heterogenních spojů. Heterogenní spoje jsou spoje, kde nejsou svařované materiály obdobného chemického a mechanického složení. Nejčastěji se jedná o svařování nerezové a uhlíkové oceli [15].



Obrázek 2 – Buttering [15], Stainless steel – nerezová ocel, weld metal - svarový kov a carbon steel - uhlíková ocel

V případě, že by svařování různých základních kovů mohlo vést k metalurgické vzájemné neslučitelnosti, které by mohly nepříznivě ovlivnit svařitelnost (např. vytvářet tvrdé skvrny, obecné křehnutí nebo praskliny), tak se speciálně používá metoda buttering. Nejlepším případem je pravděpodobně svařování křehké oceli (uhlíkové) na šedou nebo tvárnou litinu obsahující 2 až 4 % uhlíku C [2]. Pokud se použije přídavný materiál z uhlíkové oceli, nebo austenitická nerezová oceli, která je jednoduše slučitelná se základním kovovým materiálem. Tak promísení uhlíku s litinou může způsobit, že svarový kov bude náchylný k žíhání za vzniku křehkého martenzitu. Pravděpodobně by vedl k praskání ve svaru.

Dalším místem, kde je třeba vzít v úvahu promísení, je překrývání svarů různou povrchovou úpravou (např. ochranné nátěry proti korozi nebo opotřebení). Příliš velké promísení se základním kovem může vážně zhoršit požadované vlastnosti povrchu. Pomáhá více vrstev překrytí (k překonání promísení) nebo vytvoření přechodové vrstvy (k blokování promísení).

1.2 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)

Tepelně ovlivněnou oblastí (TOO) nazýváme oblast svarového spoje ovlivněnou teplem od svařování. V této oblasti dochází ke změnám mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla při svařování. V případě svařování kovů a slitin bez polymorfní přeměny (Cu, Ni, Al) nedohází ke změně mikrostruktury a probíhají pouze:

- substrukturní změny,
- rekrytalizace,
- růst zrn.

V kovech a slitinách s polymorfní přeměnou (ocelí) dochází v TOO k výrazným strukturálním změnám. Tyto změny mají vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování nelegovaných ocelí s polymorfní přeměnou $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ se TOO rozděluje na charakteristická pásma, která jsou znázorněna na obrázku 3.

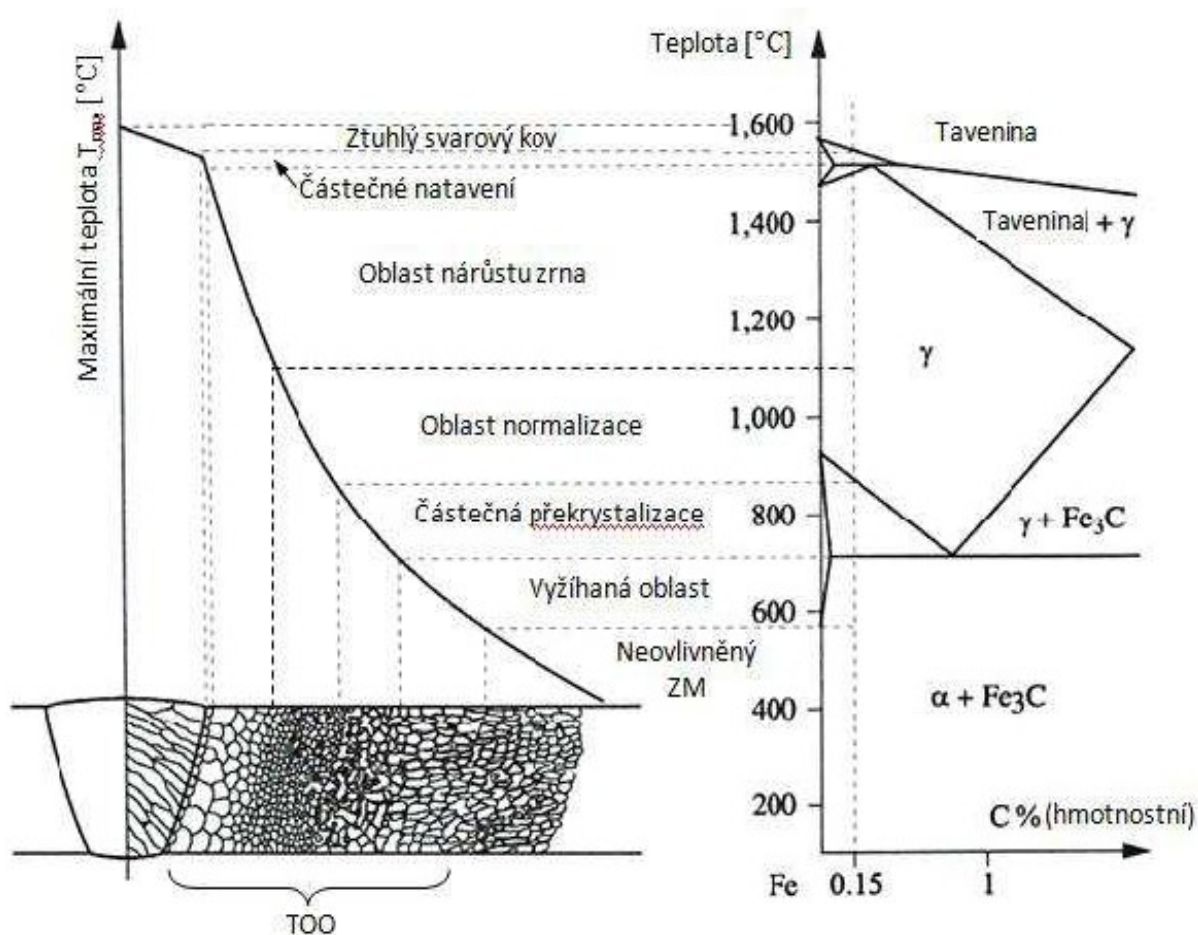
Pásmo částečného natavení tvoří přechod z TOO do svarového kovu. U většiny ocelí se tato oblast redukuje na linii nazývanou hranice ztavení, případně na plochu, protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.

Pásmo přehřátí, tedy oblast s teplotami nad A_3 , je oblast překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn, tak zvanou teplotu přehřátí. Pro nelegované oceli je teplota přehřátí kolem 1050 °C, pro mikrolegované oceli je teplota asi 1250 až 1300 °C a pro nízkolegované oceli asi 1200 °C.

Pásmo normalizace je definované teplotami A_3 a teplotou přehřátí s teplotou přehřátí s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

Pásmo částečné překrystalisace v rozmezí teplot A_1 až A_3 s neúplnou polymorfní přeměnou.

Pásmo pod teplotou A_1 , ve kterém probíhají změny buď v rámci tuhého roztoku α Fe, případně substrukturní.

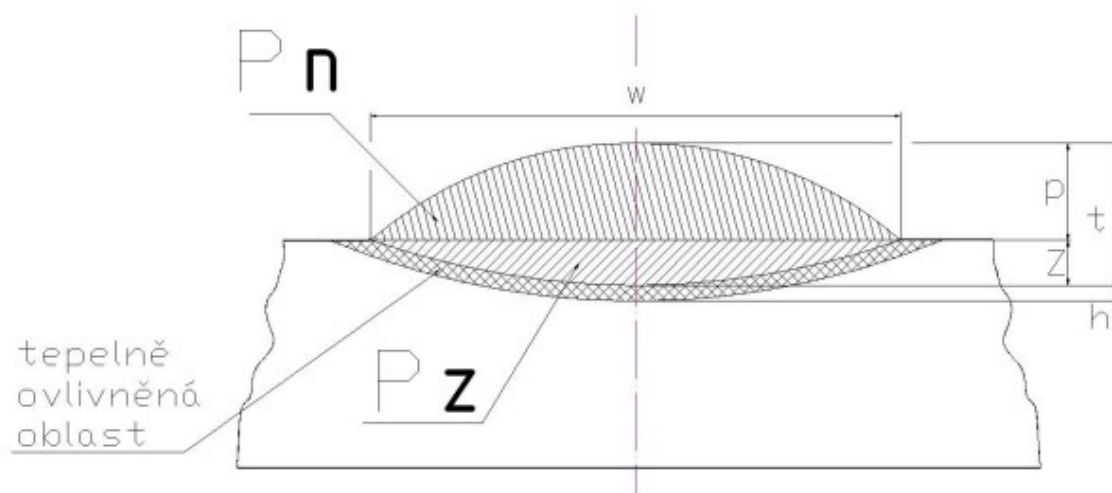


Obrázek 3 - Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [13]

Účinky tepelně deformačního cyklu svařování na vlastnosti svarových spojů lze shrnout následovně. Pokles pevnosti pozorujeme v tepelně ovlivněné oblasti těsně nad teplotou A_1 , zejména při svařování legovaných zušlechtěných ocelí. V těchto případech se doporučuje limitovat použitý tepelný příkon svařování, aby šířka popuštěné oblasti byla minimální. S ohledem na malou šířku TOO zkoušíme pevnost pásem TOO na vzorcích se simulovaným svařovacím cyklem, nebo nepřímo měřením tvrdosti [13].

1.3 Konkrétní výpočty promísení

Chemické složení svarového kovu spoje je určeno stupněm promísení D , tato hodnota výrazně závisí na metodě svařování, svařovacích parametrech a technologických podmínkách. Pro stanovení této hodnoty se provádí praktická zkouška, která spočívá v tom, že se provede řez v rovině kolmé na podélnou osu svaru. Řez se vybrousí a naleptá. Po naleptání můžeme určit plochu protavení (závaru) P_z a plochu převýšení (návaru) P_n .



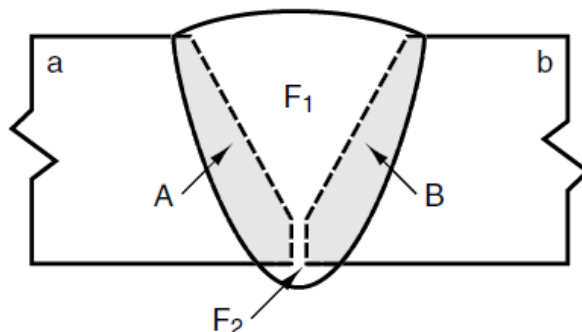
Obrázek 4 - Příčný řez návarem [6] p – převýšení, z – závar, t – celková výška návazu, h – výška TOO

Hodnota promísení D , se udává jako podíl základního materiálu ve svarovém kovu spoje a lze vyjádřit vztahem:

$$D = \frac{P_z}{P_n + P_z} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Výpočet promísení tupého svaru typu V

Na níže uvedeném obrázku je znázorněný tupý svar typu V, na kterém jsou znázorněné potřebné plochy k provedení výpočtu. Jedná se o heterogenní svar – materiály nejsou stejné, liší se chemickými a mechanickými vlastnostmi.



Obrázek 5 - Stanovení promísení pro V svar [5] a – uhlíková ocel, b – nerez ocel

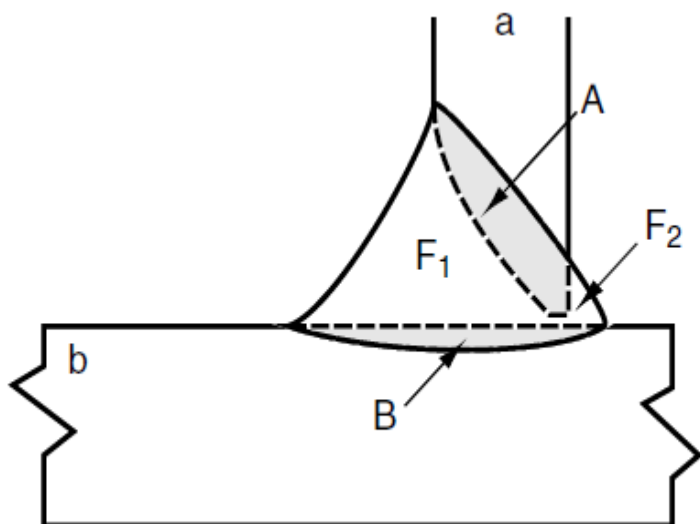
$$D_a = \frac{A}{A+B+(F_1+F_2)} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

$$D_b = \frac{B}{A+B+(F_1+F_2)} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

$$D = \frac{A+B}{A+B+(F_1+F_2)} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Výpočet promísení u koutového svaru

Výpočet je zcela obdobný jako u předešlého příkladu.



$$D = \frac{A+B}{A+B+(F_1+F_2)} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

Obrázek 6 - Stanovení promísení u koutového svaru [5]

2. Svařování

Svařováním vzniká vlivem působením tepla (respektive tlaku) a použití vhodného přídavného materiálu (obdobného chemického či mechanického složení jako má základní materiál) nerozebíratelná spojení. Tyto spoje se používají při spojování strojních částí i celých konstrukcí, které jsou součástí jednoduchých tvarů – tvářené hutné polotovary (tyče, pásy, plechy, trubky a jiné profily). Takto vzniklé polotovary se nazývají svařence, respektive svarky, které se ve většině případů dále zpracovávají převážně obráběním. Technologie výroby složitých svařenců je z hlediska svařování mimořádně, ale v konečném důsledku vede často k efektivnímu řešení, kde se z většího množství jednoduše vyrobených dílů svaří celek. Ve srovnání s jinou technologií je tento postup časově úspornější a méně nákladný [11].

Hlavní výhodou tohoto spojení je velká a spolehlivá pevnost, trvanlivost a také těsnost. Svařované konstrukce jsou velice jednoduché a v porovnání s odlitky mají výrazně větší úsporu materiálu – až 50 %. Další výhodou je zvyšování produktivity práce a výrazné zkracování výrobních časů. V kusové a malosériové výrobě umožňuje rychlé uskutečnění konstrukčních návrhů.

Hlavní nevýhodou je nerozebíratelnost svarových spojů, změna struktury, která ovlivňuje mechanické vlastnosti svarových spojů a dále vznik vnitřních pnutí a deformací (popřípadě výskyt vnitřních vad materiálů). K realizaci kvalitního svarového spoje je potřeba mít dostatečně kvalifikovaný personál – technik či dělník.

Svařování se používá téměř ve všech výrobních oborech. Nejvíce při výrobě nových strojů a velkých konstrukčních celků (ocelové konstrukce, tlakové nádoby, kotle, parní generátory, jaderné reaktory, mosty a různé dopravní prostředky) a taky při jejich opravách.

2.1 Obloukové svařování

Svařování elektrickým obloukem je v současnosti nejpoužívanější metoda tavného svařování. Zdrojem tepla je elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a svařovaným materiálem, případně mezi dvěma elektrodami zapojenými na vhodný elektrický zdroj [11]. Vlivem tepla elektrického oblouku dojde k lokálnímu natavení a následnému svaření součástí.

Tepelný výkon elektrického oblouku Q je množství tepla, které projde z oblouku do sváru. Účinnost elektrického oblouku η je závislá na druhu svařování a bývá 0,7 až 0,85.

Vzorec pro tepelný výkon elektrického oblouku:

$$Q = \eta \cdot U \cdot I [W] \quad (6)$$

Při svařování se používá stejnosměrný nebo střídavý proud o intenzitě (30 až 500 A) a napětí (10 až 70 V). Zdrojem stejnosměrného proudu jsou točivé svařovací agregáty a zdrojem střídavého proudu jsou svařovací transformátory [11].

2.1 Svařování ruční obalenou elektrodou

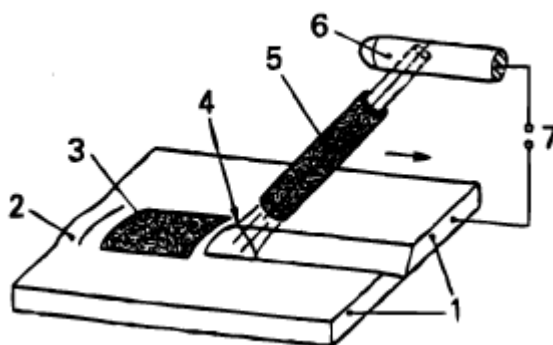
Pro tento způsob svařování se jako přídavný materiál používají obalené elektrody, které se skládají z jádra a obalu elektrody. Jádro elektrody tvoří drát různých průměrů (1,6 2,0 2,5 3,2 4,0 5,0 a 6,0 mm). Při hoření oblouku vznikají z obalu kouře a plyny, které tvoří ochrannou vrstvu a brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku ke svarové lázni [11].

Podle složení obalu se elektrody rozdělují na:

- kyselé – A,
- bazické – B,
- celulózní – C,
- stabilizační,
- rutilové – R,
- rutil-kyselé – RA,
- rutil-bazické – RB,
- rutil-celulózní – RC,
- tlustostěnné rutilové – RP.

Metoda má své číselné značení – 111 a vyznačuje se tím, že elektrický oblouk hoří mezi odtavující se elektrodou a tavnou lázní. Elektroda je přitom u držáku svařovacího oblouku a přídavného svarového materiálu. Pro ruční obloukové svařování se používá stejnosměrný proud a také i střídavý proud. Při svařování stejnosměrným proudem se u většiny elektrod záporný pól dává na elektrodu a kladný pól na obrobek. Tohle pravidlo neplatí pro bazické elektrody z důvodu lepšího svařování na kladném pólu. To samé platí pro některé výrobky celulózních elektrod [16].

Při vedení elektrického oblouku a elektrody musí být elektroda mírně skloněna proti svarové housence. Je třeba postupovat tak, že elektroda je mírně skloněna proti svarové housence, aby roztavená struska nepředbíhala elektrický oblouk a nedošlo ke vzniku struskových vměstků ve svarovém kovu (vady svaru). Délka elektrického oblouku se z pravidla rovná hodnotě průměru jádra elektrody. U ručního svařování se nastavuje pouze síla proudu. Napětí svařovacího oblouku vyplývá z délky svařovacího oblouku, které jsou uvedené výrobcem svařovací elektrody. S přibývajícím silou proudu stoupá odtavovací výkon, rychlost svařování a zvětšuje se závar [11].



Obrázek 6 - Schéma ručního svařování elektrickým obloukem [11] 1 – obrobek, 2 – svar, 3 – struska, 4 – svařovací oblouk, 5 – obalovaná elektroda, 6 – držák elektrody, 7 – zdroj svařovacího proudu

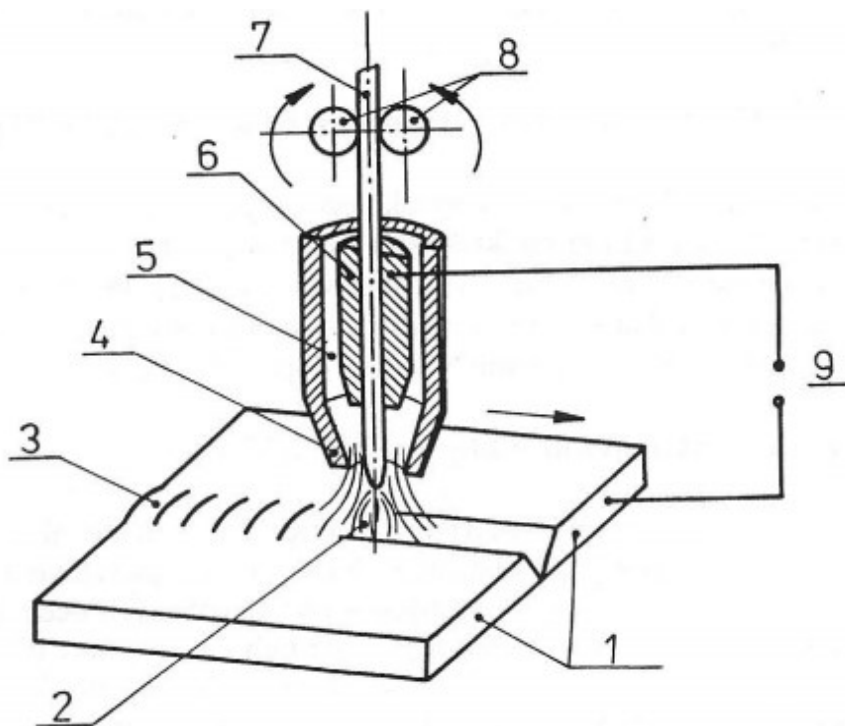
Svarová housenka musí být zakončena tak, aby nedošlo ke vzniku staženiny v koncovém kráteru. To znamená, že svářeč musí v koncovém kráteru při odtavení svarového kovu provést ještě zatočení a odtavit ještě určité množství svarového kovu, aby nedošlo ke vzniku staženiny [16].

2.2 Svařování metodou MIG/MAG

Svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivního plynu MAG se značí 135 a spolu se svařováním obalenou elektrodou patří k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svařování tavící se kovovou elektrodou v inertním plynu MIG se značkou 131. Tato metoda se výrazně používá z objemných konstrukcí, staveb, lodí a dopravních prostředků vyráběných z hliníkových slitin. Mezi hlavní důvody rozšíření metody MIG/MAG patří:

- široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů,
- snadná možnost mechanizace a robotizace,
- velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení.

Svařování metodou 131/135 je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě svařovacího drátu (přídavného materiálu) a základním materiálem v ochranné atmosféře ve formě inertního nebo aktivního plynu. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu. Nejpoužívanější způsob přenosu kovu je zkratový pro tenké plechy a sprchový se používá pro větší tloušťky plechů. Při použití vysokých proudů se změní charakter přenosu kovu obloukem a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. Ochranné plyny mají významný vliv na: typ přenosu kovu, přenos tepelné energie, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry svařování. Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného materiálu. Převážně ovlivňuje přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku [11].



Obrázek 7 - Princip svařování tavící se elektrodou v inertním nebo aktivním plynu – MIG [11] 1 - svařovaný materiál, 2 - elektrický oblouk, 3 – svar, 4 - plynová hubice, 5 - ochranný plyn, 6 - kontaktní průvlak, 7 - přídavný drát, 8 - podávací kladky, 9 - zdroj proudu

Výhody této metody svařování:

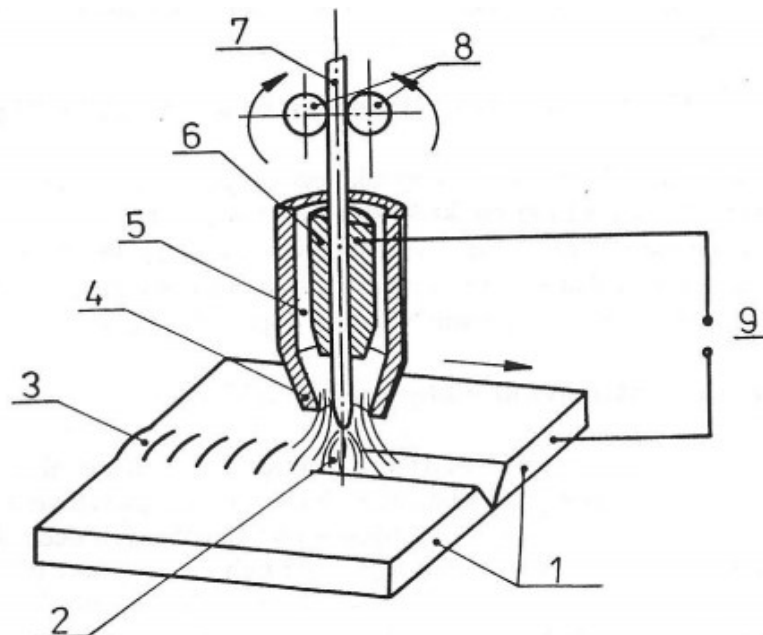
- svařování ve všech polohách (od tloušťky materiálu 0,8mm),
- minimální tvorba strusky,
- přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně,
- vysoká efektivita, úspory nedopalků tzv. nekonečným drátem,
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svařence,
- široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu,
- stabilní plynová ochrana v různých variantách umožňující diferencované typy přenosu kovu v oblouku a ovlivnění mechanických vlastností svarů,
- snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování,
- nízká pórovitost.

U metody MIG/MAG se používá stejnosměrný zdroj s výstupem proudu, kde je kladný pól zdroje připojen na drátovou elektrodu. Zdroje pro svařování MIG/MAG mají plochou statickou charakteristiku s tzv. konstantním napětím se samoregulační schopností udržování konstantní délky oblouku [11].

2.3 Svařování metodou WIG (TIG)

Obloukové svařování netavicí se elektrodou v inertním plynu má zkratku WIG (TIG) a číselné značení je 141. Při svařování této metody hoří oblouk mezi netavicí se elektrodou a základním materiálem. Ochranu elektrody a tavné lázně zajišťuje netečný plyn o vysoké čistotě minimálně 99.995 %. Nejčastěji se používá argon, helium nebo jejich směsí. Při svařování se jako přídavný materiál používá drát, a to ručním způsobem nebo jako automatické svařování s podavačem drátu.

U této metody lze svařování rozdělit na svařování se střídavým proudem a stejnosměrným proudem. Střídavý proud se využívá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitinách, zatím co stejnosměrný proud má vysoké uplatnění při svařování středně a vysoce legované oceli (měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další). Pro svařování uhlíkové oceli se metoda 141 používá méně z důvodu zamezení vzniku nebezpečných pórů ve svaru a z ekonomického hlediska. Svařování wolframovou elektrodou se dá použít i pro spojování obtížně svařitelných materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku jakou má titan a zirkon [14].



Obrázek 8 - Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu – TIG [11] 1 - svařovaný materiál, 2 - elektrický oblouk, 3 - svar, 4 - přídavný materiál, 5 - plynová hubice, 6 - ochranný plyn, 7 - kontaktní kleštiny, 8 - wolframová elektroda, 9 - zdroj proudu

Svařování stejnosměrným proudem patří mezi základní způsob zapojí při svařování metodou 141. Elektroda je připojena k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál je připojený na kladný pól. Toto zapojení se nazývá přímé. Vzniklé teplo z oblouku je nerovnoměrné a přibližně 1/3 tepla připadá na elektrodu a 2/3 z celkového tepla je přenášeno do základního materiálu. Nepřímá polarita zapojení se z důvodu velkého tepelného zatížení nevyužívá a výjimečně se dá použít při svařování tenkostěnných svařenců z hliníku nízkým proudem [11].

Svařování střídavým proudem se při kladné polaritě používá na svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin z důvodu čistícího účinku. Výrazným problémem při svařování hliníku je vrstva oxidu hlinitého, která chrání za běžných podmínek hliník proti vzniku další oxidaci. Čistící účinek vzniká při zapojení elektrody na kladný pól zdroje. Na základním materiálu se vytvoří katodová skvrna, která není stabilní a pohybuje se místa pokrytá oxidy [11]. Další formou čistícího účinku je rozložení argonu na kladné ionty a elektrony, které jsou urychlené k tavné lázni a působí na oxidy mechanickým účinkem. Dochází ke stažení vrstvy oxidu k okraji svarové lázně.

3. Charakteristika základního materiálu

3.1 Ocel S355

Oceli S355 jsou normou ČSN 10025-1 označovány jako standardní konstrukční ocel. Vyrábí se v standardním rozsahu průmyslových tvarů a průřezů. V Evropě konstrukční ocel musí splňovat evropské normy EN 10025-2, kterou řídí ECIS (Evropský výbor pro železo a ocel normalizaci) a je podmnožinou CEN (Evropský výbor pro normalizaci) [3]. V souladu s klasifikací evropské normy se u konstrukčních ocelí předepisuje použití standardních symbolů jako je například ocel EN 10025-2 – S355J0C+N nebo +AR,

kde: **S** – označuje skutečnost, že jde o konstrukční ocel

355 – v souvislosti z minimální hodnoty zaručené meze kluzu pro tloušťky ≤ 16 mm v MPa

J2/K2/JR/JO – houževnatost materiálu v souvislosti s rázem v ohybu vrubovou zkouškou

W – v souvislosti s atmosférickou korozivzdorností

Z – konstrukční ocel se zlepšenou pevností kolmo k povrchu

C – v souvislosti s tvářením za studena

+N/+Ar/+M – v souvislosti se stavem dodávky [3] [4].

3.1.1 Chemické složení

Chemické složení konstrukčních ocelí je nesmírně důležité k určování přídavného materiálu a je to základní faktor k určování mechanických vlastností ocelí. Například S355K2W je tvrzená konstrukční ocel (K2), která byla navržena s chemickým složením odolávající zvýšené atmosférické korozi (W) [3]. Z toho důvodu má tato ocel mírně odlišné chemické složení než standardní třídy S355.

Tabulka 1 - Chemické složení oceli S355 [3]

Materiál [ČSN 10027-1]	C [%] pro max. tloušťku [mm]			Mn [%] max.	Si [%] max.	P [%] max.	S [%] max.	N [%] max.	Cu [%] max.
	≤ 16	>16 ≤40	>40						
S355JR	0,240	0,240	0,240	1,600	0,550	0,035	0,035	0,012	0,550
S355JO	0,200	0,200	0,220	1,600	0,550	0,300	0,035	0,012	0,550
S355J2	0,200	0,200	0,220	1,600	0,550	0,250	0,025	-	0,550
S355K2	0,200	0,200	0,220	1,600	0,550	0,025	0,025	-	0,550

Vysvětlivky: *S* – konstrukční oceli, *JR* – zkouška vrubové houževnatosti při 20 °C, *JO* – zkouška vrubové houževnatosti při 0 °C, *J2* – zkouška vrubové houževnatosti při -20 °C, *K2* – zkouška vrubové houževnatosti při -20 °C, KV – nárazová práce

Chemické složení ocelí S355 je uvedeno v tabulce. Procentuální výskyt uhlíku C se mění v závislosti na tloušťce materiálu. Zbývající prvky mají stejnou nebo zcela obdobnou hodnotu.

Jeden z aspektů posouzení komplexní charakteristiky ocelí pro danou součást je určení tzv. ekvivalentního obsahu uhlíku Ce. Je to tzv. přepočet vlivu legujících prvků na ekvivalentní množství uhlíku. Tato materiálová konstanta vyjadřuje vliv prvků obsažených v oceli na její prokalitelnost. Pomocí něj se stanovují svařitelnosti nelegovaných, nízkolegovaných, středně legovaných tvářených ocelí a ocelí na odlitky. Dominantním prvkem ve všech rovnicích, které jsou stanovené normou je uhlík.

Tabulka 2 – Maximální hodnota uhlíkového ekvivalentu [3]

Materiál [ČSN 10027-1]	Maximální hodnota CEV [%] pro výrobky jmenovité tloušťky [mm]				
	≤30	>30 ≤40	>30 ≤150	>150 ≤250	>250 ≤450
S355JR	0,45	0,47	0,47	0,49	-
S355JO	0,45	0,47	0,47	0,49	-
S355J2	0,45	0,47	0,47	0,46	0,49
S355K2	0,45	0,47	0,47	0,49	0,49

3.1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanickými vlastnostmi je hodnoceno chování materiálu za působení vnějších mechanických sil. Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Na základě těchto vlastností se odvozují další vlastnosti materiálu jako je tvrdost, odolnost proti únavě a odolnost proti tečení. Mechanické vlastnosti mají zásadní vliv na určování klasifikace oceli, tedy i pro aplikaci. Chemické složení je dominantním faktorem pro mechanické vlastnosti oceli, proto je velmi důležité pochopit základní standardy pro mechanické vlastnosti jako jsou mez kluzu a pevnost v tahu [4].

Tabulka 3 – Minimální mez kluzu oceli S355 [3]

Materiál [ČSN 10027-1]	Minimální mez kluzu R_{eH} [MPa] pro výrobky jmenovité tloušťky [mm]								
	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	>63 ≤ 80	>80 ≤ 100	>100 ≤ 150	>150 ≤ 200	>200 ≤ 250	>250 ≤ 450
S355JR	355	345	335	325	315	295	285	275	-
S355JO	355	345	335	325	315	295	285	275	-
S355J2	355	345	335	325	315	295	285	275	265
S355K2	355	345	335	325	315	295	285	275	265

Mez kluzu R_e je napětí, při němž se tyč začne výrazně deformovat, aniž by se zvyšovala zatěžující síla. V tabulce 3 mez kluzu udává minimální sílu potřebnou k vytvoření trvalé deformace v oceli pro různé tloušťky materiálu. Pevnost v tahu u konstrukčních ocelí je vztahována k bodu, v němž při maximální síle dochází k přerušení materiálu.

Tabulka 4 – Pevnost v tahu R_m oceli S355 [3]

Materiál [ČSN 10027-1]	Pevnost v tahu R_m [Mpa] pro výrobky jmenovité tloušťky [mm]				
	≤ 3	$>3 \leq 100$	$>100 \leq 150$	$>150 \leq 250$	$>250 \leq 400$
S355JR	510 - 680	470 - 360	450 - 600	450 - 600	-
S355JO	511 - 680	471 - 360	451 - 600	451 - 600	-
S355J2	512 - 680	472 - 360	452 - 600	452 - 600	315
S355K2	513 - 680	473 - 360	453 - 600	453 - 600	315

Tabulka 5 – Minimální nárazová práce KV oceli S355 [3]

Materiál [ČSN 10027-1]	Teplota [°C]	Minimální nárazová práce KV [J] pro výrobky jmenovité tloušťky [mm]		
		≤150	>150 ≤250	>150 ≤250
S355JR	20	27	27	-
S355JO	0	27	27	-
S355J2	-20	27	27	27
S355K2	-20	40	33	33

3.1.3 Technologické vlastnosti a použití

Konstrukční oceli jsou využívány ve spousty odvětvích strojírenství a jejich uplatnění může být různorodé. Jsou zvláště užitečné, protože nabízejí jedinečnou kombinaci dobrých svařovacích vlastností a zaručenou pevností. Z toho důvodu se konstrukční oceli vyrábějí a už v normalizovaných tvarech a rozměrech. Od různých I-nosníků, U-nosníků až po trubky a ocelové plechy atd. Díky dobrým svařovacím vlastnostem jsou konstrukční oceli převážně využívány ve stavebnictví, kde se používá pro všechny účely v různých měřítkách. Například jako hlavní nosné části pro přenos těžkých zařízení jako je mrakodrap, dům, továrna, kancelář atd.

4. Experimentální část

Experimentální část práce se zabývá zhotovením a analýzou návarů na zkušební desku. Návary byly provedeny metodou 111 a 135. Každá tato metoda se skládá z vlastní zkušební desky s navařeným určitým počtem návarů, které byly změřeny pomocí posuvového měřidla. K zjištění nezbytných ploch pro výpočet promísení byly vzorky rozřezány a na metalografické brusce vybroušeny a naleptány. Následně bylo nutné zjistit plochu převýšení a plochu protavení, ze kterých se vypočítá stupeň promísení svarového kovu. Výchozím materiálem byla ocel S355 o tloušťce 7 mm.

Cílem tohoto experimentu bylo stanovit výsledné promísení pro každý návar u jednotlivých metod svařování a pokusit se zjistit hlavní příčinu změny stupně promísení vlivem změn svařovacích parametrů.

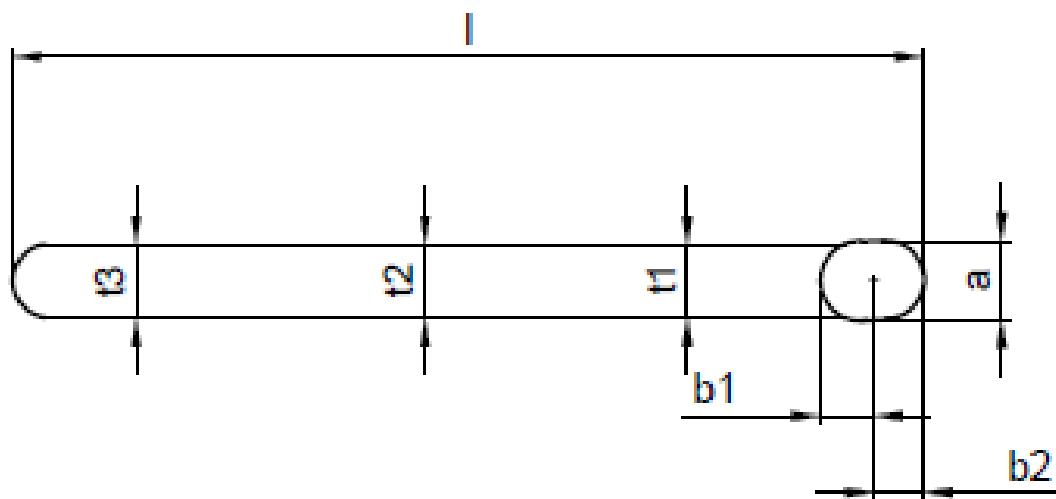
4.1 Postup měření

Základními prvky jsou napětí a proud. Z tohoto důvodu se na každou desku navaří několik návarů, které byly rozděleny do více skupin. V každé této skupině se měnily hodnoty napětí a proudu. Nejdříve byly použity nejmenší svařovací parametry určené výrobcem svařovacích elektrod či drátů. Pro zpřesnění výsledku se z každých svařovacích parametrů vytvořily vždy dva návary. Při navařování byl změřen čas, za který byla housenka vytvořena. Dále byly použity střední hodnoty a maximálně dovolené hodnoty. Vzorky se nechaly vychladnout a návar byl oklepán pomocí kladívka.



Obrázek 9 - Ukázka navařené desky

Na obrázku 9 lze vidět ukázkou navařené desky. Nachází se zde 6 housenek rozdělených do tří skupin dle svařovacích parametrů. Každý návar se pečlivě změří pomocí posuvového měřidla dle obrázku 10.



Obrázek 10 – Návar

Na každé housence byly naměřeny tyto veličiny:

- Délka celkového návaru l [mm]
- Tloušťka návaru – začátek t_1 [mm]
- Tloušťka návaru – střed t_3 [mm]
- Tloušťka návaru – konec t_2 [mm]
- Šířka návaru a [mm]
- Délka svarové lázně před obloukem b_1 [mm]
- Délka svarové lázně za obloukem b_2 [mm]

Ke zjištění hloubky návaru c , plochy převýšení P_z a plochy protavení P_n se vzorky poslaly do laboratoře, kde byly rozřezány. Pro dosažení lepších hodnot a k menšímu ovlivnění měřené plochy byla použita metalografická bruska. Pomocí této brusky se vybrousily ovlivněné plochy a následně naleptány Nitalem pro dosažení lepší viditelnosti makrostruktury.

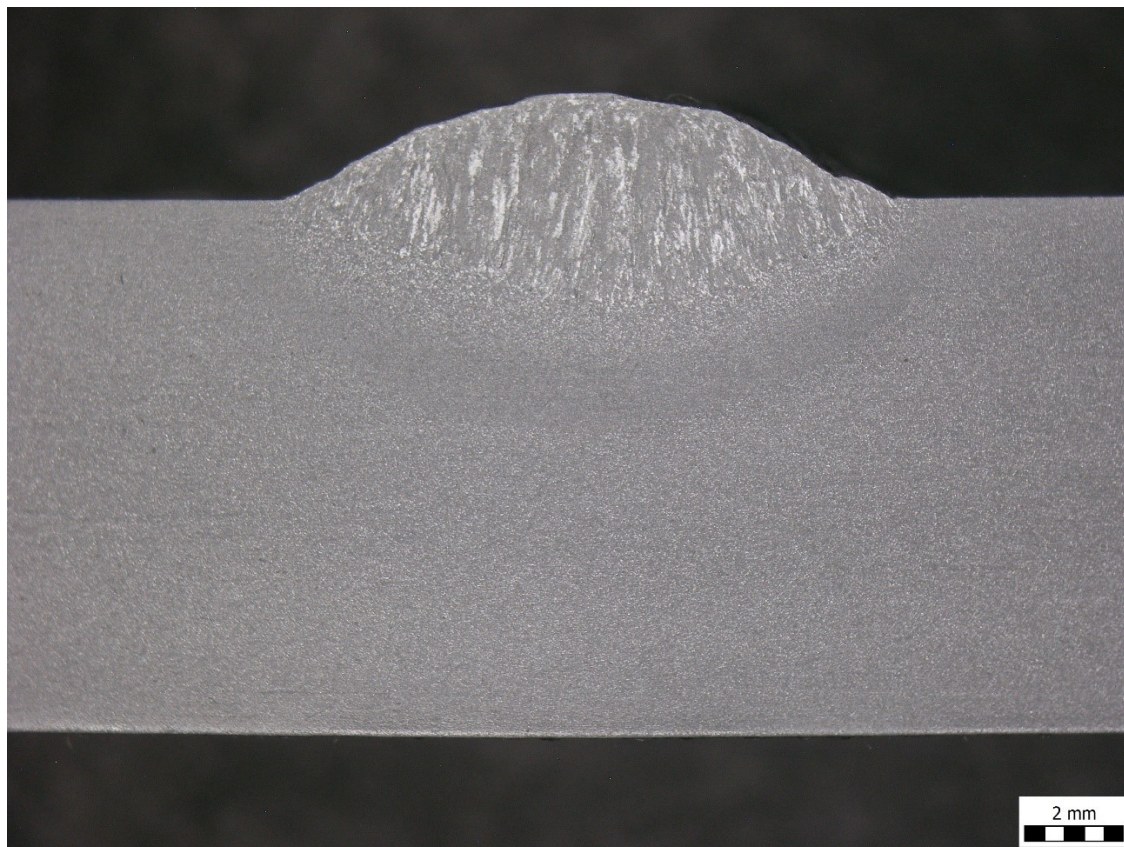


Obrázek 12 - Rozřezaná deska

Obrázky byly vyfoceny fotoaparátem na černém pozadí. K zachování stejného měřítka je na obrázku přiložena část svinovacího metru.



Obrázek 11 - Pohled na makrostrukturu

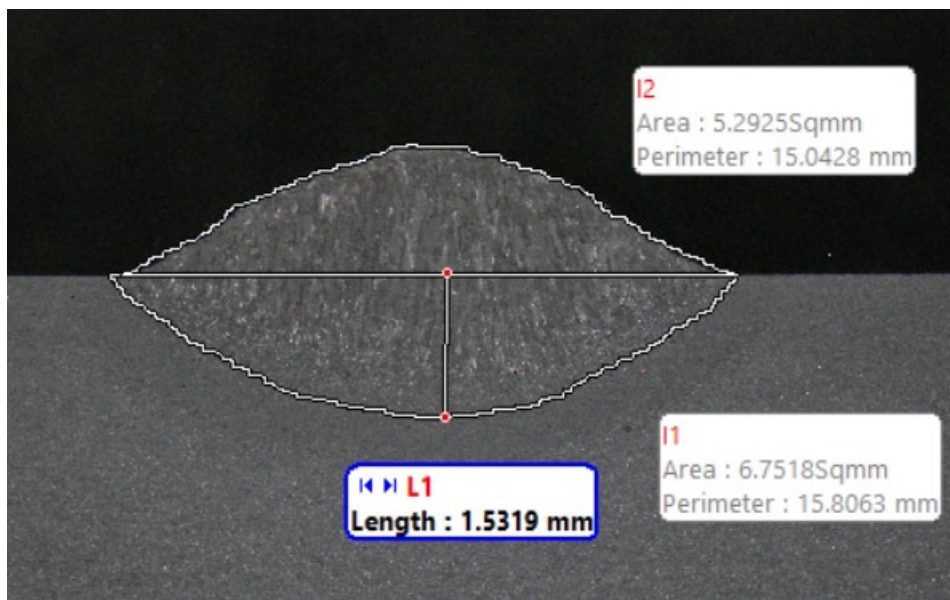


Obrázek 13 – Vybroušený a naleptaný návar

Na obrázku 13 je zobrazen vybroušený a naleptaný průřez návaru, který je vyfocený v měřítku 1:20.

V další části této práce bylo nutné stanovit plochu návaru P_z a plochu převýšení P_n (viz. obrázek 4). Plocha převýšení a plocha provaření se stanovili pomocí programu MotiC Images Plus 2.0 ML.

V programu je nutné ručně označit požadovanou plochu a nastavit vhodné měřítko. Plocha P_n se nachází v horní části obrázku (oblast převýšení svarového návaru) a plocha P_z se nachází ve spodní části (oblast protavení až po tepelně ovlivněnou oblast). V tomto konkrétním případě bylo nutno použít měřítko 1:20 a získat požadovanou plochu návaru. Stupeň promísení D se vypočítá dle vzorce (2).



Obrázek 14 - Stanovení ploch

Na Obrázku 14 je znázorněn příklad stanovení ploch pro výpočet promísení. I₂ je plocha převýšení návaru P_n, I₁ je plocha protavení P_z a přímka L₁ znázorňuje hloubku závaru.

4.2 Výsledek metody 111

Při svařování metodou 111 byly použity 3 průměry elektrod (Ø 2,5 mm, Ø 3,2 mm, Ø 4 mm). U každého uvedeného průměru byly použity 3 druhy svařovacích parametrů – minimální, střední a maximální svařovací parametry. Na základě těchto údajů byla na danou desku navařena svařovací housenka. Pro zpřesnění výsledků byly u každých parametrů vytvořeny dvě housenky a jejich číselné hodnoty se následně zprůměrují.

Přídavný materiál

Pro metodu 111 na základě chemických a mechanický parametrů volím svařovací přídavný materiál **OK 48.00**.

OK 48.00 je spolehlivá univerzální nízko-vodíková elektroda určená pro nelegované a jemnozrnné oceli. Lze ji využít pro všechny svařovací polohy. Poskytuje stabilní oblouk a nabízí spolehlivé a konzistentní mechanické vlastnosti. Tato elektroda umožňuje vykonávání všech typů svarů – od kořenové vrstvy až po vrstvu krycí. Bez ohledu na povahu prováděné práce, tloušťky či podmínky při svařování [12].

Tabulky 6 a 7 znázorňují mechanické a chemické hodnoty pro zvolenou elektrodu:

Tabulka 6 – Mechanické vlastnosti [12]

Mez pevnosti v tahu	Mez kluzu	Ochranný plyn	Prodloužení
565 MPa	475 MPa	ISO AWS	29 %

Tabulka 7 – Chemické vlastnosti [12]

Mn [%]	C [%]	Si [%]
1,10	0,06	0,50

Dále u chemického složení patří difuzní vodík HD, pro který platí:

$$HD < 4,0 \text{ ml/100g [12].}$$

V tabulce 13 jsou vypsány svařovací parametry pro jednotlivé průměry elektrod. Každý průměr svařovací elektrody má svou vlastní svařovací desku. Postup navařování je popsán v kapitole 4.1.

Tabulka 8 – Svařovací parametry pro metodu 111

Průměr elektrody [mm]	Ø 2,5			Ø 3,2			Ø 4		
Svařovací proud I [A]	70	90	110	90	120	140	125	170	200
Svařovací napětí U [V]	23	23	23	23	23	23	26	26	26
Čas první housenky t ₁ [s]	45	38	32	38	32	35	36	32	23
Čas druhé housenky t ₂ [s]	42	33	36	36	37	39	33	30	34

Z naměřených hodnot byla vypočítaná **rychlost svařování v** , **svařovací příkon Q** **svařovací příkon Q_{ef}** – efektivní. Výpočet byl proveden dle vzorce (1). Koeficient tepelné účinnosti pro ruční obloukové svařování obalenou elektrodou je $k = 0,8$ [13].

$$Q_{ef} = \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad \left[\frac{J}{cm} \right] \quad (7)$$

$$v = \frac{s}{t} \quad \left[\frac{cm}{min} \right] \quad (8)$$



Obrázek 15 - Ukázka navařené desky metodou 111

Obrázek 17 obsahuje navařené návary pro $\varnothing 4$ mm. Na levé straně se nachází dva návary s nejmenšími svařovacími parametry: $I = 125$ A, $U = 26$ V. Prostřední návary mají hodnoty: $I = 170$ A, $U = 26$ V a na pravé straně jsou návary s nejvyššími parametry: $I = 200$ A, $U = 26$. Následující tabulky obsahují naměřené a vypočítané hodnoty pro daný průměr svařovací elektrody.

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro obalovanou elektrodu $\varnothing 2,5$ mm

Typy návarů	a		b		c	
l [mm]	104,32	102,85	105,25	103,58	106,31	107,17
t₁ [mm]	7,33	6,68	9,47	8,42	10,10	11,83
t₂ [mm]	6,86	6,66	8,37	8,07	9,31	10,79
t₃ [mm]	5,92	6,88	7,48	7,75	9,54	10,58
a [mm]	7,34	7,39	10,03	9,97	12,03	12,73
b₂ [mm]	3,85	3,52	3,38	4,63	5,95	6,76
b₁ [mm]	5,21	5,24	7,43	7,11	9,78	8,96
v [cm/min]	13,91	14,69	16,62	18,83	19,93	17,86
Q [J/cm]	0,548	0,437	0,470	0,575	0,657	0,737
Q_{ef} [J/cm]	0,684	0,546	0,588	0,719	0,822	0,921

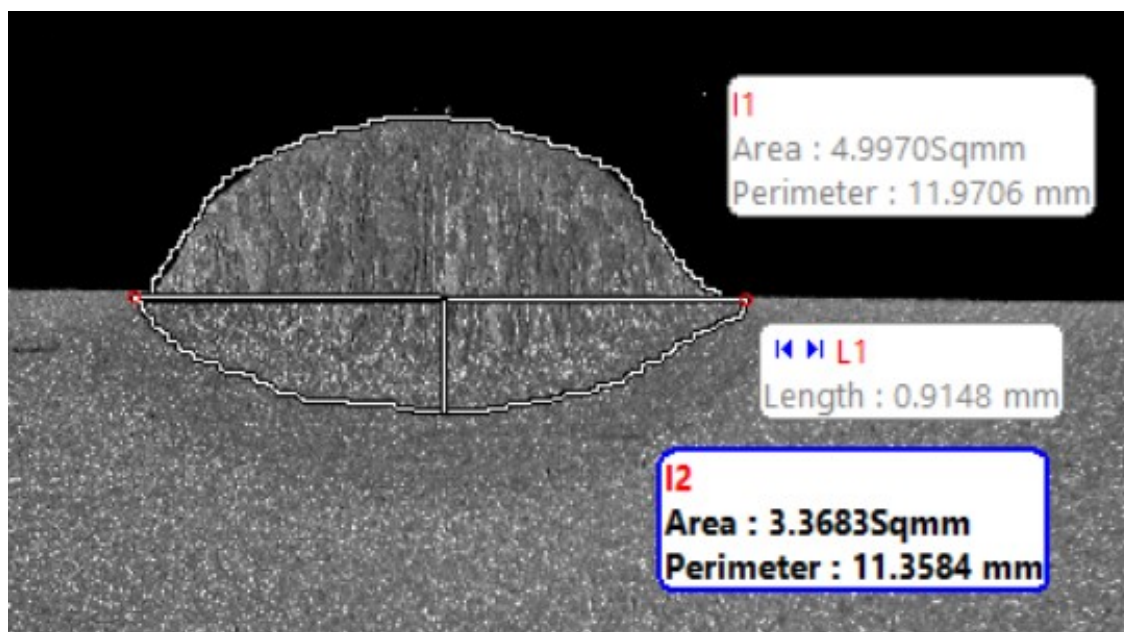
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pro obalovanou elektrodu Ø 3,2 mm

Typy návarů	a		b		c	
l [mm]	105,86	106,13	112,58	106,55	107,75	107,15
t₁ [mm]	7,06	7,32	8,68	9,07	11,14	12,92
t₂ [mm]	7,45	7,41	8,73	9,66	11,28	12,49
t₃ [mm]	7,51	6,78	8,92	9,73	11,40	12,29
a [mm]	8,40	9,10	11,22	11,68	13,55	13,26
b₂ [mm]	5,50	5,06	5,62	5,96	5,73	6,25
b₁ [mm]	6,30	6,30	6,87	7,34	9,19	11,16
v [cm/min]	27,62	17,69	21,12	17,28	18,47	16,48
Q [J/cm]	0,704	0,562	0,627	0,767	0,837	0,938
Q_{ef} [J/cm]	0,880	0,702	0,784	0,958	1,046	1,172

Tabulka 11 – Naměřené hodnoty pro obalovanou elektrodu Ø 4 mm

Typy návarů	a		b		c	
l [mm]	102,390	101,240	107,330	105,440	98,340	125,050
t₁ [mm]	9,600	10,620	12,340	13,150	13,890	15,310
t₂ [mm]	10,460	9,990	12,130	13,480	12,610	13,920
t₃ [mm]	9,220	9,830	12,430	12,740	13,390	13,900
a [mm]	9,270	10,740	13,380	13,470	15,240	14,760
b₂ [mm]	4,440	5,230	6,430	5,780	6,920	11,190
b₁ [mm]	7,090	8,110	11,420	14,580	14,820	15,710
v [cm/min]	17,065	18,407	20,120	21,088	25,654	22,067
Q [J/cm]	1,105	0,882	1,005	1,228	1,351	1,514
Q_{ef} [J/cm]	1,382	1,102	1,256	1,535	1,689	1,893

Stanovení hodnoty promísení D



Obrázek 16 - Ukázka stanovení plochy pro výpočet promísení, kde L1 je hloubka závaru, I1 je plocha převýšení a I2 je plocha protavení

Z každého průřezu návaru se takto stanovila plocha převýšení a provaření. Na základě těchto hodnot se vypočítalo promísení jednotlivých návarů, které jsou zapsány v tabulkách 12, 13 a 14:

Tabulka 12 – Výpočet promísení D pro metodu 111 – Ø 2,5 mm

Pn [mm ²]	Pz [mm ²]	D [-]	D [%]
5,6316	3,2793	0,37	36,80
4,7897	2,8822	0,38	37,57
5,8588	6,5904	0,53	52,94
4,9024	5,4579	0,53	52,68
6,3535	13,5242	0,68	68,04
6,1025	11,9772	0,66	66,25

Tabulka 13 – Výpočet promísení D metodou 111 – Ø 3,2 mm

Pn [mm ²]	Pz [mm ²]	D [-]	D [%]
5,2168	3,2546	0,38	38,42
5,0009	3,6102	0,42	41,92
5,2444	6,7803	0,56	56,39
7,5407	10,3530	0,58	57,86
6,5239	13,5881	0,68	67,56
8,1600	16,5192	0,67	66,94

Tabulka 14 – Výpočet promísení D metodou 111 – Ø 4 mm

Pn [mm ²]	Pz [mm ²]	D [-]	D [%]
9,8489	7,8524	0,44	44,36
8,4071	8,4296	0,50	50,07
7,8742	14,8906	0,65	65,41
7,7618	17,2752	0,69	69,00
6,7072	23,4110	0,78	77,73
7,7122	23,7711	0,76	75,50

Z uvedených ploch lze usoudit, že při nízkých svařovacích parametrech je plocha převýšení větší než plocha protavení. U středních parametrů začíná být plocha protavení větší než plocha převýšení, která je následně u nejvyšších parametrů několika násobně menší. Vypočítané hodnoty promísení jsou u průměru elektrod 2,5 a 3,2 mm poměrně obdobné. Se zvyšujícími se parametry se zvětšuje i hodnota promísení. Svařovací napětí U ovlivňuje převážně šířku svarové lázně, která se u zvolených průměrů moc neodlišuje a z důvodu obdobného napětí. Svařovací proud I převýšení, a hlavně hloubku protavení. Pro průměr 4 mm byl zvolen interval 125 – 200 A. Vlivem vysokého napětí vzniká velká plocha protavení a ta ovlivňuje výpočet stupně promísení. Hodnoty promísení jsou téměř o 10% vyšší než u přechozích průměrů svařovacích elektrod.

4.3 Výsledky metody 135

Svařovací metoda 135 má obdobný postup jako metoda 111 s tím, že místo svařovací elektrody se zde používá svařovací drát OK AUTROD 12.58. Návary jsou opět rozděleny do více skupin z důvodu změny svařovacích parametrů. První dvě skupiny byly provedeny tzv. zkratovou metodou a poté byla použita tzv. sprchová metoda.

Přídavný materiál

OK Autrod 12.58 je poměděný drát pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností do 500 MPa a jemnozrnných ocelí s minimální mezi kluzu 400 MPa v ochranných atmosférách plynů Ar/20CO₂ nebo čistém CO₂ [14]. Uvedené mechanické vlastnosti byly získány při použití směsi Ar/20CO₂.

Tabulka 15 – OK Autrod 12.58, mechanické vlastnosti

Mez pevnosti v tahu	Mez kluzu	Ochranný plyn	Prodloužení
515 MPa	430 MPa	EN 80Ar/20CO2 (M21)	26 %

Tabulka 16 – OK Autrod 12.58, chemické vlastnosti

Mn	C	Si
1,05	0,074	0,55



Obrázek 17 - Pohled na metodu 135



Obrázek 18 - Pohled na metodu 135

Na obrázku 17 a 18 jsou znázorněny návary. U sprchové metody byl zvolen vysoký proud, který způsobil provaření svařovací desky. Z tohoto důvodu byly parametry sníženy a návar byl proveden znovu viz. obrázek 18.

Tabulka 17 – Naměřené hodnoty pro metodu 135

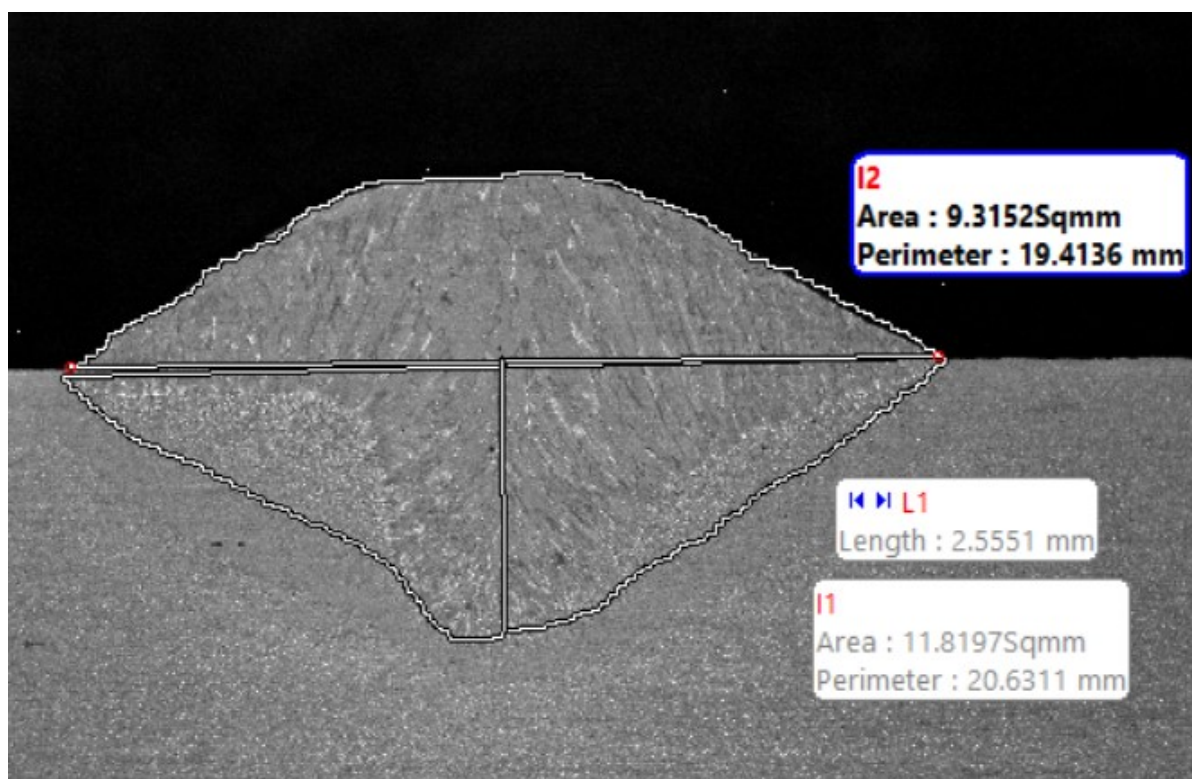
Rozdělení housenek	a		b		c		d	
Svařovací proud I [A]	197	197	295	298	428	428	410	410
Svařovací napětí U [V]	16,9	16,9	27,4	28,4	36,2	36,2	29,8	29,8
Čas svařování housenky [s]	20	20	11	11	11	9	9	9
Druh svařování	zkrat	zkrat	zkrat	zkrat	sprcha	sprcha	sprcha	sprcha

Svařovací parametry jsou vypsány v tabulce 17 a naměřené hodnoty na návarech jsou uvedené v tabulce 18.

Tabulka 18 – Naměřené hodnoty pro metodu 135

Typ návarů	a		b		c	d	
l [mm]	114,00	115,00	120,00	125,00	120,00	115,00	105,00
t1 [mm]	5,88	5,88	12,48	11,72	11,60	10,38	10,71
t2 [mm]	5,87	5,94	11,48	10,57	13,06	9,16	8,61
t3 [mm]	6,74	6,45	10,75	10,37	13,72	8,43	8,87
a [mm]	8,15	7,51	12,65	9,21	13,45	9,35	10,27
b2 [mm]	8,69	7,57	9,09	13,73	11,62	7,57	6,73
b1 [mm]	3,84	5,39	18,76	15,09	25,08	9,31	10,94
c [mm]	3,40	3,42	4,25	4,38	7,10	7,66	8,79
v [cm/min]	7,10	7,10	13,80	13,80	23,30	23,30	23,30
Q [J/cm]	2,25	2,25	2,81	2,94	3,19	3,19	2,52
Qef [J/cm]	2,81	2,81	3,51	3,68	3,99	3,99	3,15

Stanovení promísení D



Obrázek 19 - Ukázka stanovení plochy pro výpočet promísení, L1 - hloubka závaru, I1 - plocha převýšení, I2 - plocha protavení

Tabulka 19 – Výpočet promísení

Pn [mm²]	Pz [mm²]	D [-]	D [%]
6,9082	3,7839	0,35	35,39
6,4305	3,3395	0,34	34,18
10,3356	10,8440	0,51	51,20
9,3943	12,1913	0,56	56,48
16,8143	23,4891	0,58	58,28
13,0263	19,7862	0,60	60,30
12,0768	20,2161	0,63	62,60

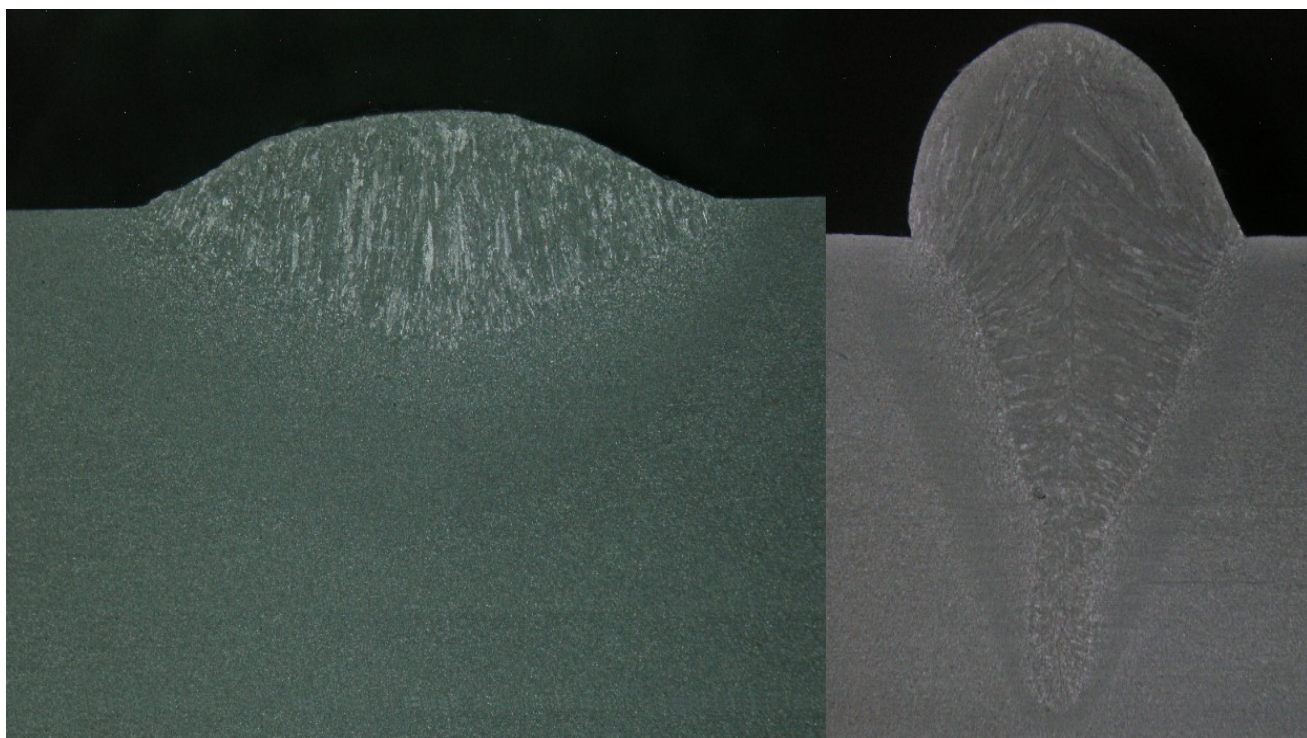
V prvních dvou návarech byla hodnota plochy převýšení téměř 2x větší než plocha protavení. S přidáním svařovacího proudu se zase plocha protavení zvětšila a v poslední fázi experimentu přesáhla hodnotu převýšení. Při nízkých parametrech se vypočítaný stupeň promísení pohyboval okolo 34 % se zvyšující se proudem se hodnota promísení zvýšila až na hodnotu 62,6 %.

5. Vyhodnocení a diskuse dosažených výsledků

5.1. Srovnání metod

Vypočítané promísení metody 111 má téměř shodné výsledky u dvou průměrů a to 2,5 a 3,2 mm. Elektroda o průměru 4 mm má o něco vyšší hodnotu promísení než přechází dva průměry elektrody. Ve srovnání s metodou 135 jsou výsledky poněkud jiné. Vypočítané promísení s nejmenšími parametry má obdobné hodnoty jako metoda 111 – Ø 2,5 mm. Zatímco u nejvyšších svařovacích parametrů jsou hodnoty docela odlišné. Ve srovnání s průměrem 2,5 mm se výsledek liší o 9 % a u průměru 4 mm je to více jak 15 %.

Největší vliv na výsledný stupeň promísení má svařovací proud, který ovlivňuje plochu protavení. Při zvolení vysokých ampér se plocha protavení výrazně zvětší. Hodnota může být až několika násobně větší, než je plocha převýšení svarového kovu. Například u průměru 4 mm byl stanoven stupeň promísení 47,21 % pro 125 A. Při použité maximální hodnotě svařovacího proudu 200 A pro metodu 111 a zmiňovaný průměr 4 mm byl stanovený stupeň promísení 76,62 %. Svařovací napětí a průměr elektrody ovlivňuje šířku svarové lázně. V experimentální části se hodnota napětí při změnách elektrického proudu vůbec nezměnila. Změna hodnoty napětí se vyskytla pouze při změně svařovací metody.



Obrázek 20 - Srovnání metody 111 (vlevo) a 135 (vpravo)

Obrázek 20 znázorňuje rozdíl mezi průřezem návaru vytvořený metodou 111 (návar na levé straně) a metodou 135 (návar na pravé straně). Pravý návar má hluboký průvar a oproti metodě 111 má několika násobně větší plochu převýšení.

Stupeň promísení udávaný literaturou se pro metodu 111 a 135 pohybuje od 10 % do 40 %. Z výsledku experimentu usuzují, že tyto hodnoty nejsou zcela přesné. Při použití nejmenších svařovacích parametrů ($I = 70 \text{ A}$, $U = 26 \text{ V}$) a nejmenší svařovací elektrody ($\varnothing 2,5 \text{ mm}$) se průměrný stupeň promísení pohybuje okolo hodnoty 37 % a při postupném zvyšování elektrického proudu (90 A, 110 A) se hodnota výsledného promísení zvýšila na 52,81 % a 67,14 %. Tyhle hodnoty nekorrespondují z hodnoty udávané v literatuře. V tabulce 20 jsou zprůměrovány výsledné stupně promísení.

Tabulka 20 – Srovnání průměrných hodnot promísení

Způsob svařování	D1 [%]	D2 [%]	D3 [%]	D4 [%]
111 - $\varnothing 2,5$	37,18	52,81	67,14	—
111 - $\varnothing 3,2$	40,17	57,12	67,25	—
111 - $\varnothing 4$	47,21	67,20	76,62	—
135	34,79	53,84	58,28	61,45

5.2 Možné odchylky a uplatnění

Experimentální výzkum se zabývá navařováním návarů na ocel S355. V praxi se používají různé materiály a v téhle práci na tohle není brán ohled. Existuje více typů materiálu, které se výrazně liší materiálovými vlastnostmi jako je například **měrné teplo c** , **tepelná vodivost λ** , **měrná hustota φ** , mechanické či chemické složení. Tyhle vlastnosti by mohly lehce ovlivnit výsledný stupeň promísení.

Dalším faktorem může být změna polohy svařování. V experimentu byla použita poloha PA – poloha vodorovná shora. Například u polohy PG – poloha svislá shora dolů, se používají menší svařovací parametry než u polohy PA z důvodu tečení svarového kovu směrem dolů, které by mohlo ovlivnit výsledný výpočet promísení.

6. Závěr

Práce se zabývala promísením svarového kovu při obloukových metodách svařování. Hlavní myšlenkou této práce je zjištění stupně promísení při změnách svařovacích parametrů a zjištění který ze svařovacích parametrů nejvíce ovlivňuje výsledné zředění svarového kovu.

V teoretická části je provedená studie promísení, kde byly vysvětleny nezbytné informace k porozumění dané problematiky. Dále jsou uvedeny potřebné výpočty, studie použitého materiálu S355 a stručný výklad k použitým obloukovým technologiím.

V experimentální části byl proveden návrh a realizace ověření stupně promísení u dvou technologií (111 a 135) pro oceli S355. Návrh ke stanovení dané hodnoty spočíval v navaření několika návarů na svařovací desku. Tyto návary byly rozdělené do více skupin, kde se měnily svařovací parametry. U metody 111 byl původní svařovací proud 70 A a postupně se zvyšoval až na hodnotu 200 A. Byly zde použity 3 průměry elektrod (2,5 mm, 3,2 mm a 4 mm). Pro metodu 135 se svařovací proud pohyboval od 197 A do 428 A. Ke stanovení potřebných ploch k výpočty byly vzorky rozřezány a vybroušeny na metalografické brusce.

Výsledkem práce je zjištění hlavní příčiny změny stupně promísení, a to v podobě svařovacího proudu. Se zvyšující se hodnotou proudu se zvyšovala plocha protavení, která má velký vliv na výpočet. Pro metodu 111 se výsledný stupeň pohyboval od hodnoty 37,18 % až po 76,62 %. Metoda 135 měla obdobné výsledky, jen při nejvyšších parametrech byl stupeň promísení stanoven na 61,45 %.

K získání přesnějších hodnot promísení při obloukových technologiích svařování, by se experimentální část musela rozšířit o více poloh svařování, případně přidat nový zkušební materiál, který by měl jiné vlastnosti než původní ocel S355. Tyto dva důvody by mohly ovlivnit výsledný stupeň promísení.

Vypočítané hodnoty se mohou uplatnit v tzv. diagramech pro predikci výsledné struktury v heterogenním spoji. V těchto diagramech se většinou používá hodnota 25 % nebo 50 %. Tento rozdíl může ovlivnit výslednou predikci struktury.

Další uplatnění může být v parametrických rovnicích zahrnujících promísení, kde se používá nějaká uvažovaná hodnota, která nebere ohled na svařovací parametry, což může lehce ovlivnit výpočet dané rovnice. Promísení je velice důležité sledovat při navařování,

popřípadě svařování heterogenních spojů, kdy dochází k rozředění více legovaného materiálu a musí se pokládat více vrstev.

Seznam použité literatury

- [1] *ASM handbook*. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 1615038272.
- [2] GRAY, Tom; CAMILLERI, Duncan; MCPHERSON, Norman. *Control of welding distortion in thin-Plate fabrication: design support exploiting computational simulation*. Elsevier, 2014.
- [3] ČSN EN 10025-2: *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [4] Structural Steel - S235, S275, S355 Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications. *AZO Materials* [online]. 2012 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>
- [5] Welding handbook: Clad and dissimilar metals. *AWS welding handbook: Chapter 6*.
- [6] *Vliv parametrů navařování MAG kuličkové litiny na strukturu návaru TOO: Bakalářská práce*. 1. Liberec, 2009. Dostupné také z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2705/bc_17315.pdf?sequence=1
- [7] ŠTEMBERA, Vladimír, Ľuboš MRÁZ a Ivan HRIVŇÁK. *Diagramy rozpadu austenitu vývojových čs. konstrukčních ocelí a zvarových kovov*. Bratislava: VÚZ Bratislava, 1982, 84 s.
- [8] *Stainless Steel: Grade Datasheets* [online]. Atlas Steels Technical Department, 2013 [cit.2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas%20Grade%20datasheet%20-%20all%20datasheets%20rev%20Aug%202013.pdf>
- [9] Spencer K, Embury JD, Conlon KT, Véron M, Bréchet Y. *Mater Sci Eng, A* 2004; 387-389:873
- [11] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II Část svařování: Díl 1 Základní metody tavného svařování* [online]. 1. Brno: Vysoké učení tehcnické, 2006 [cit. 2019-12-03].
- [12] *ESAB* [online]. [cit. 2020-01-9]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/index.cfm>
- [13] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 978-80-248-0870-3.
- [14] Tměj J., Neumann H., Jenší S., *Teorie svařování*, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci , Liberec, 1990
- [15] *American welding society: Buttering* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://awo.aws.org/glossary/buttering/>

[15] *Základy ručního svařování obalenou elektrodou: EWN – we are welding* [online].
[cit.2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/e-hand-grundlagen.html>

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladislavovi Ochodkovi za rady a cenné připomínky při řešení této práce.

Seznam obrázků

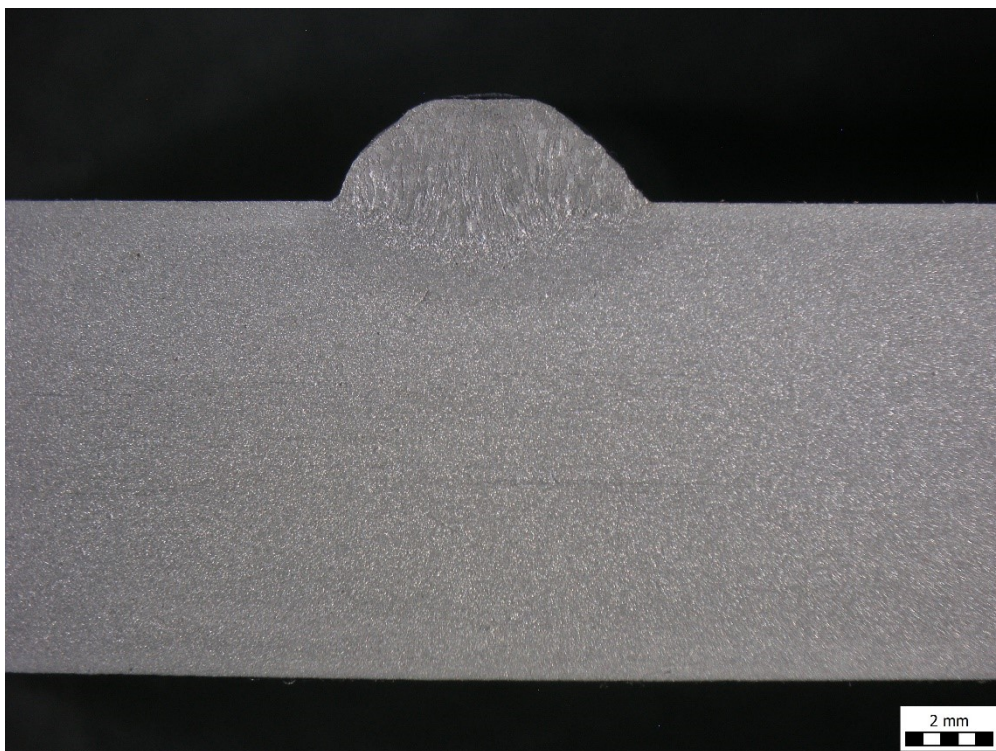
Obrázek 1 - Ukázka promíšené oblasti svarového kovu [2]	11
Obrázek 2 – Buttering [15],.....	11
Obrázek 3 - Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [13]	13
Obrázek 4 - Příčný řez návarem [6]	14
Obrázek 5 - Stanovení promísení pro V svar [5]	15
Obrázek 6 - Schéma ručního svařování elektrickým obloukem [11]	18
Obrázek 7 - Princip svařování tavící se elektrodou v inertním nebo aktivním plynu – MIG [11] 1	19
Obrázek 8 - Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu – TIG [11].....	21
Obrázek 9 - Ukázka navařené desky	26
Obrázek 10 – Návar.....	27
Obrázek 11 - Rozřezaná deska	28
Obrázek 12 - Pohled na makrostrukturu	28
Obrázek 13 – Vybroušený a naleptaný návar.....	29
Obrázek 14 - Stanovení ploch	30
Obrázek 15 - Ukázka navařené desky metodou 111	32
Obrázek 16 - Ukázka stanovení plochy pro výpočet promísení.....	34
Obrázek 17 - Pohled na metodu 135	36
Obrázek 18 - Pohled na metodu 135	37
Obrázek 19 - Ukázka stanovení plochy pro výpočet promísení.....	38
Obrázek 20 - Srovnání metody 111 a 135.....	40

Seznam příloh

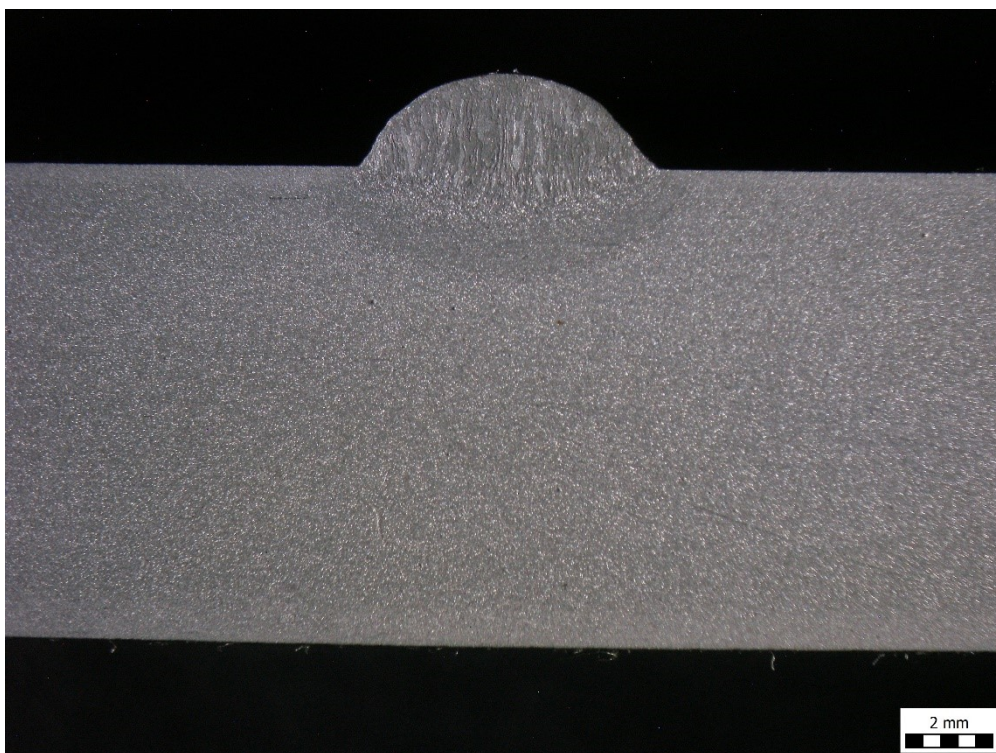
Příloha 1 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 1	49
Příloha 2 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 2.....	49
Příloha 3 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 3	50
Příloha 4 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 3	50
Příloha 5 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 5	51
Příloha 6 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 6.....	51
Příloha 7 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 2	52
Příloha 8 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 1	52

Příloha 9 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 4.....	53
Příloha 10 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 3.....	53
Příloha 11 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 5.....	54
Příloha 12 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 6.....	54
Příloha 13 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 1.....	55
Příloha 14 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 2.....	55
Příloha 15 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 4.....	56
Příloha 16 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 3.....	56
Příloha 17 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 6.....	57
Příloha 18 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 5.....	57
Příloha 19 - Svařovací metoda 135 - návar 1.....	58
Příloha 20 - Svařovací metoda 135 - návar 2.....	58
Příloha 21 - Svařovací metoda 135 - návar 4.....	59
Příloha 22 - Svařovací metoda 135 - návar 3.....	59
Příloha 23 - Svařovací metoda 135 - návar 7.....	60
Příloha 24 - Svařovací metoda 135 - návar 8.....	60
Příloha 25 - Svařovací metoda 135 - návar 10.....	61
Příloha 26 - Svařovací metoda 135 - návar 9.....	61
Příloha 27 - Pohled na metodu 111 - Ø 2,5 mm.....	62
Příloha 28 - Pohled na metodu 111 - Ø 3,2 mm.....	62
Příloha 29 - Pohled na metodu 111 - Ø 4 mm.....	63
Příloha 30 - Pohled na metodu 135 - část a.....	64
Příloha 31 - Pohled na metodu 135 - část b.....	65

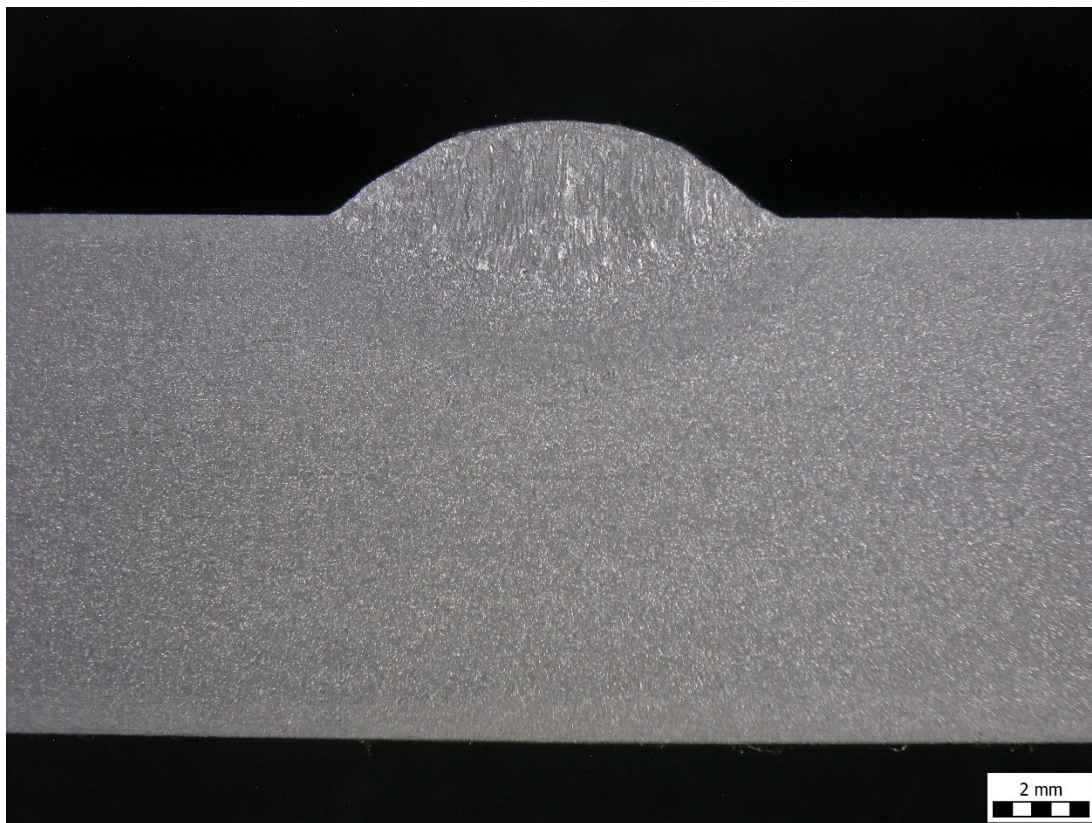
Přílohy



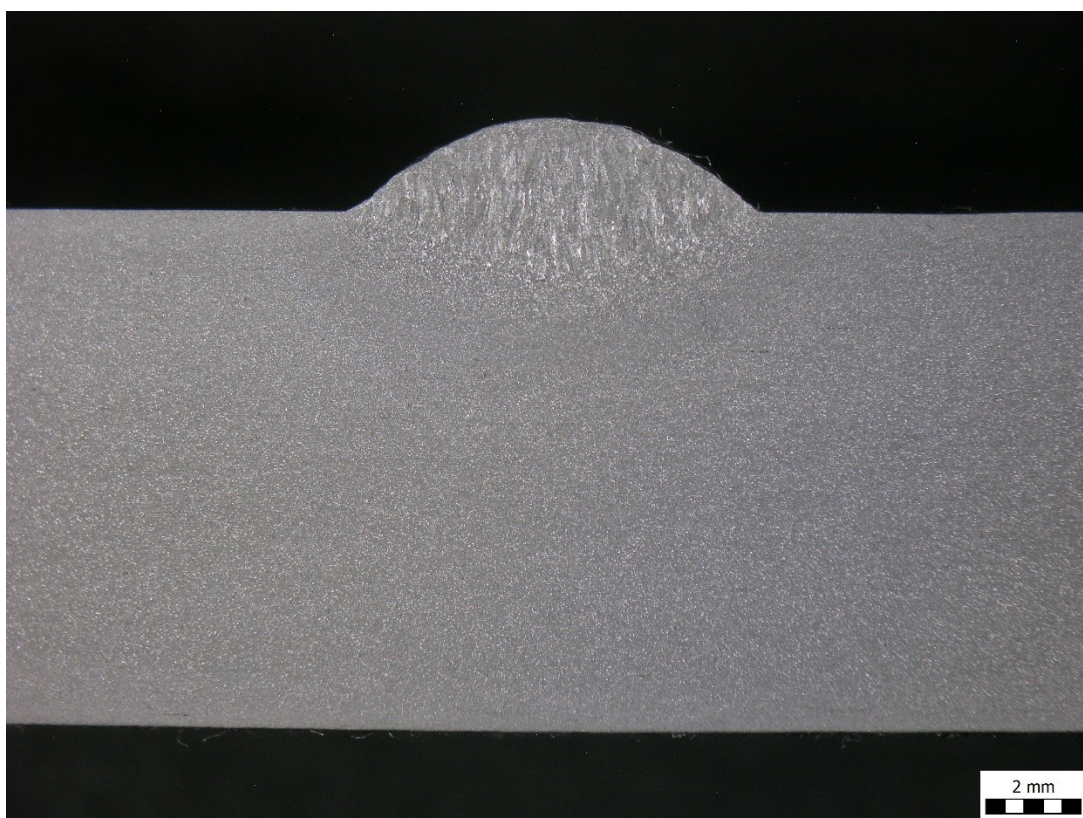
Příloha 1 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 1



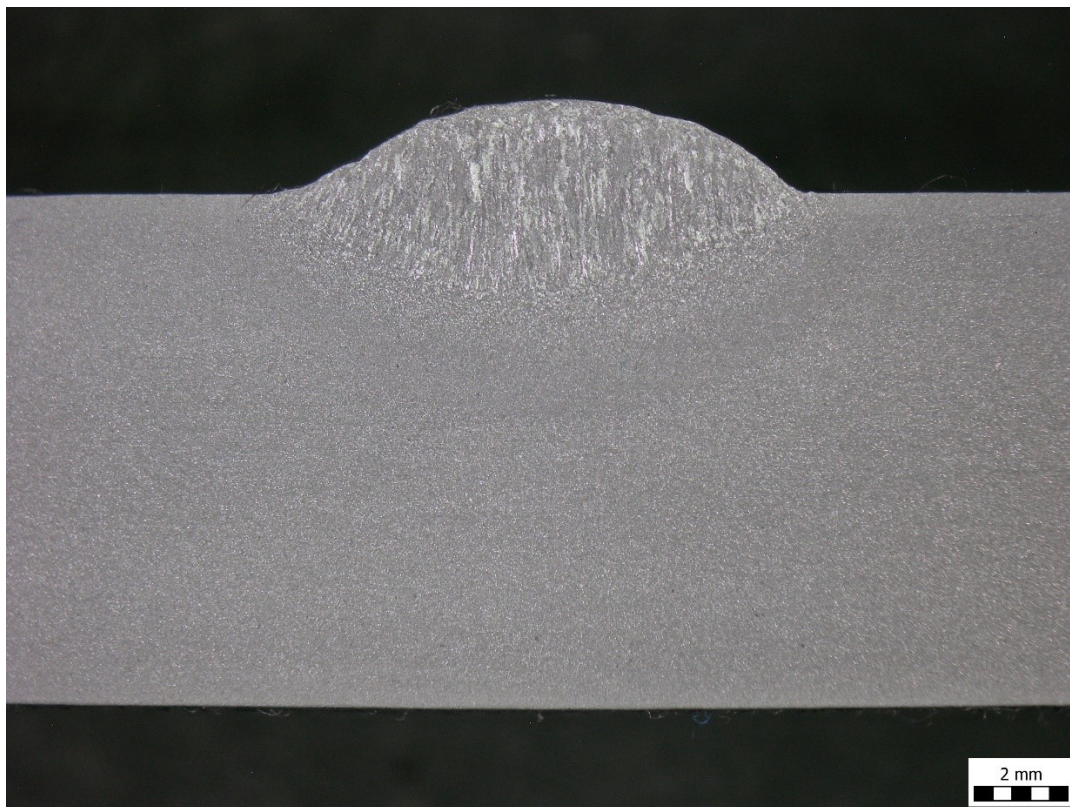
Příloha 2 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 2



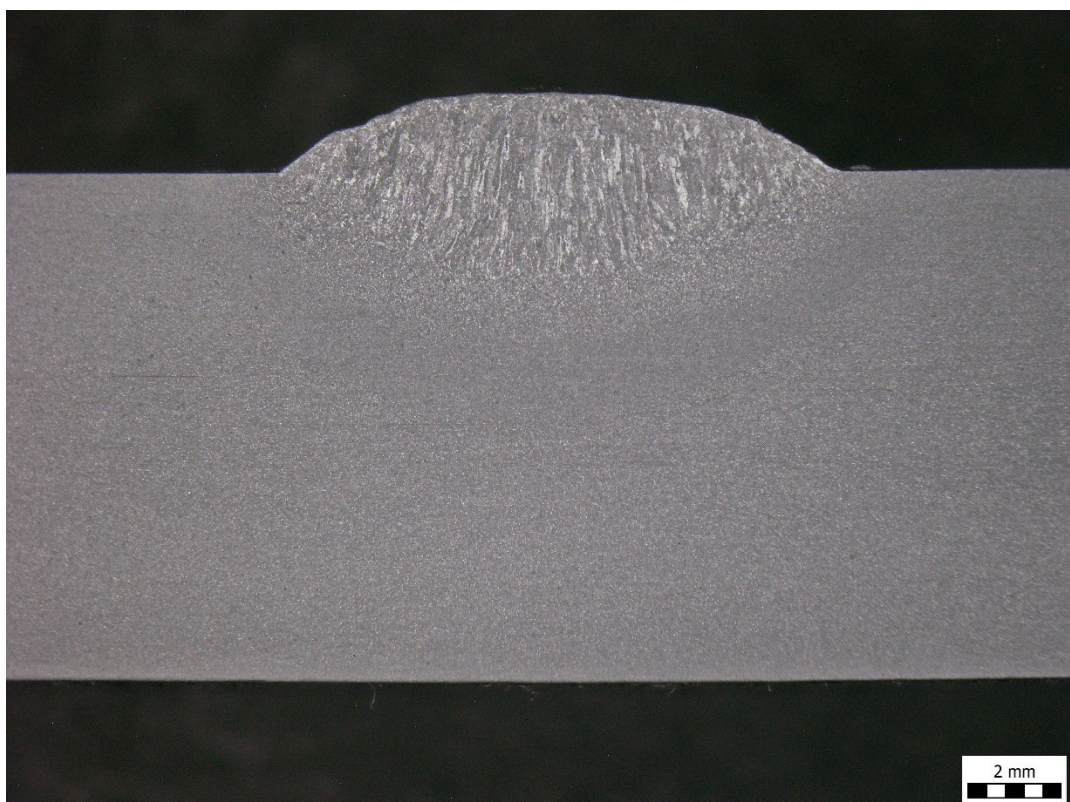
Příloha 3 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 3



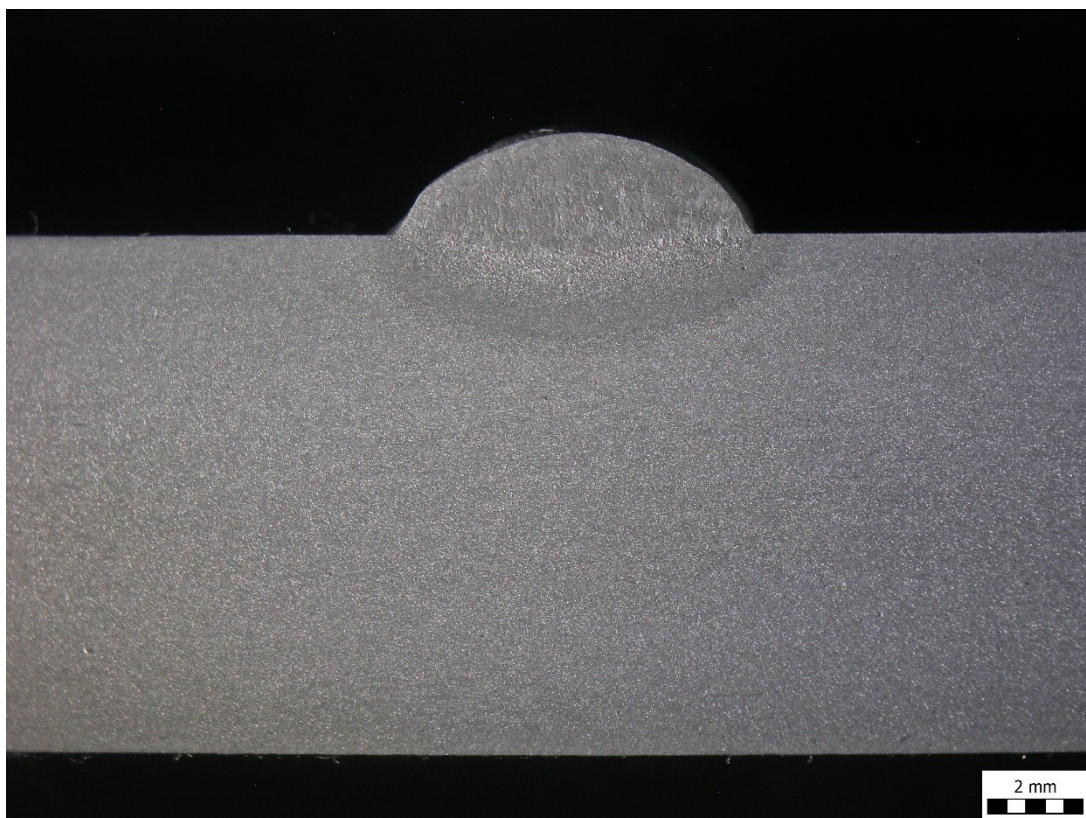
Příloha 4 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 3



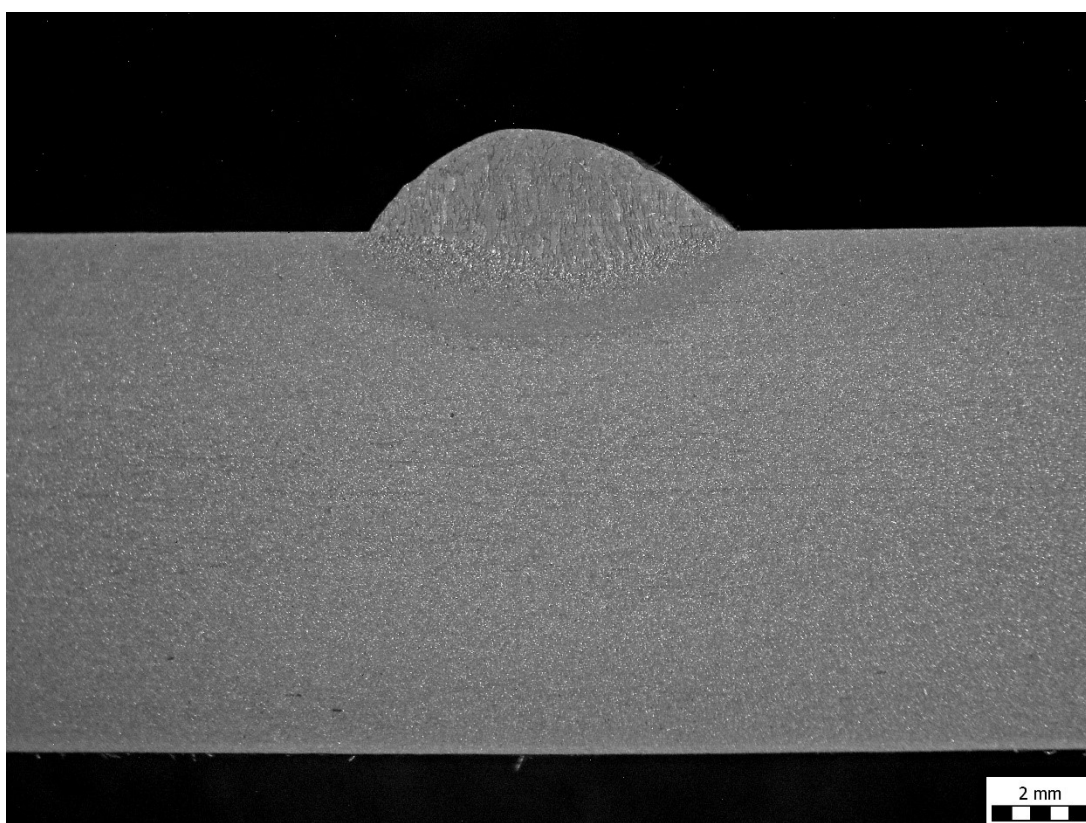
Příloha 5 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 5



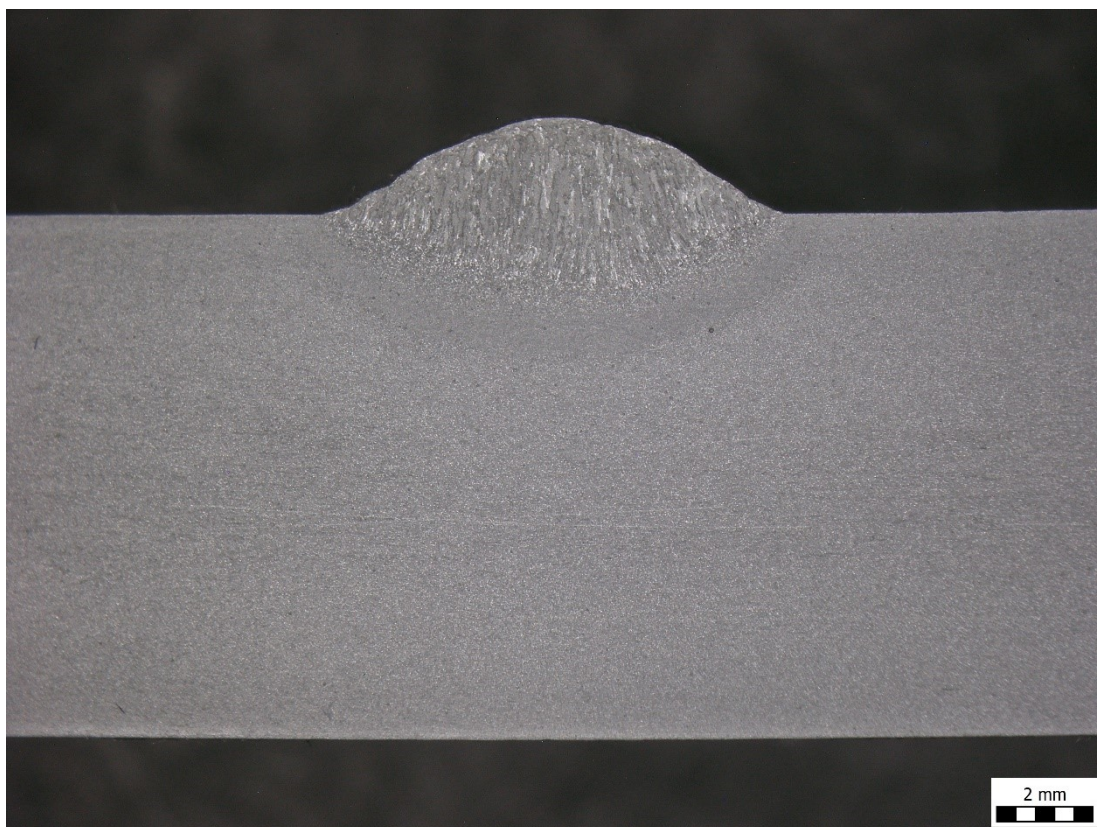
Příloha 6 - Svařovací metoda 111 - Ø 2,5 mm návar 6



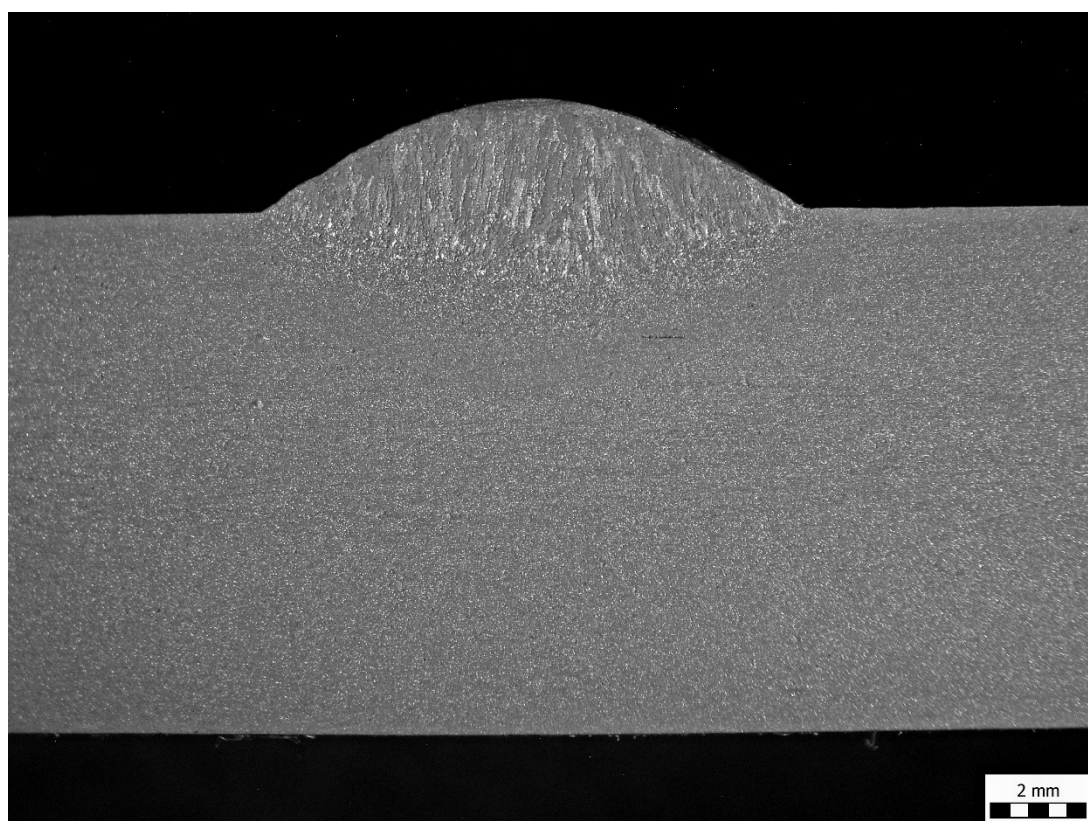
Příloha 8 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 1



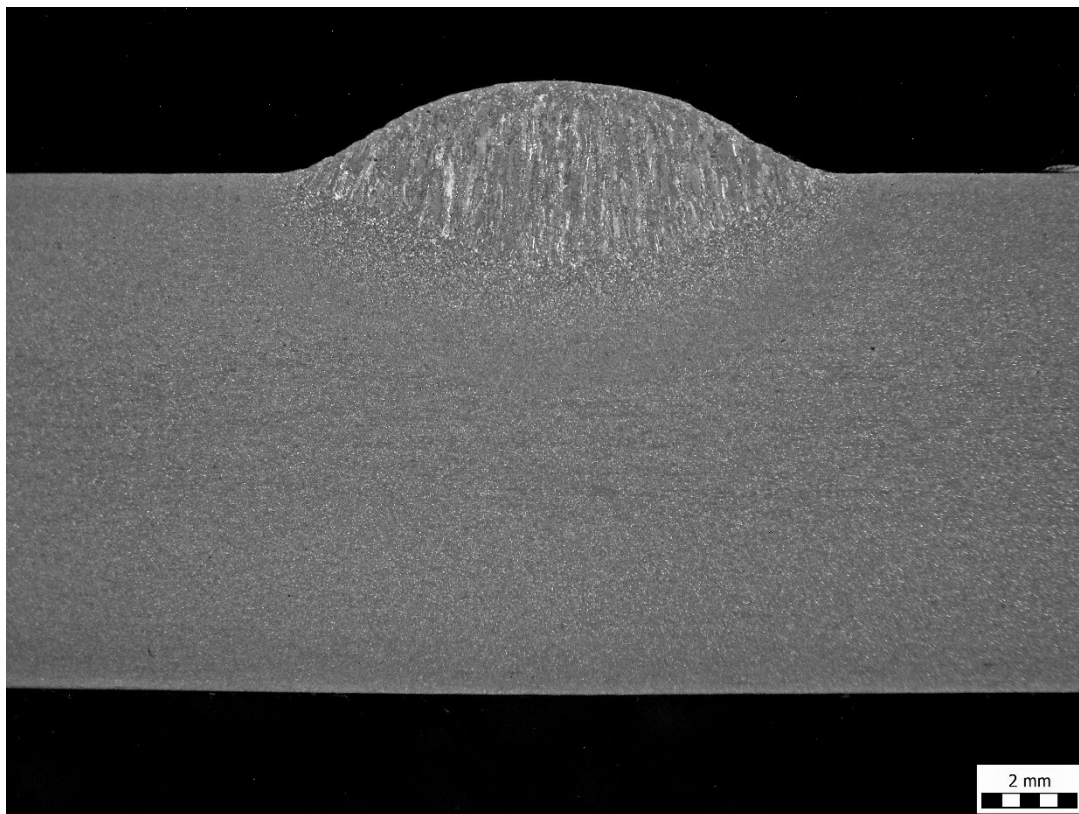
Příloha 7 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 2



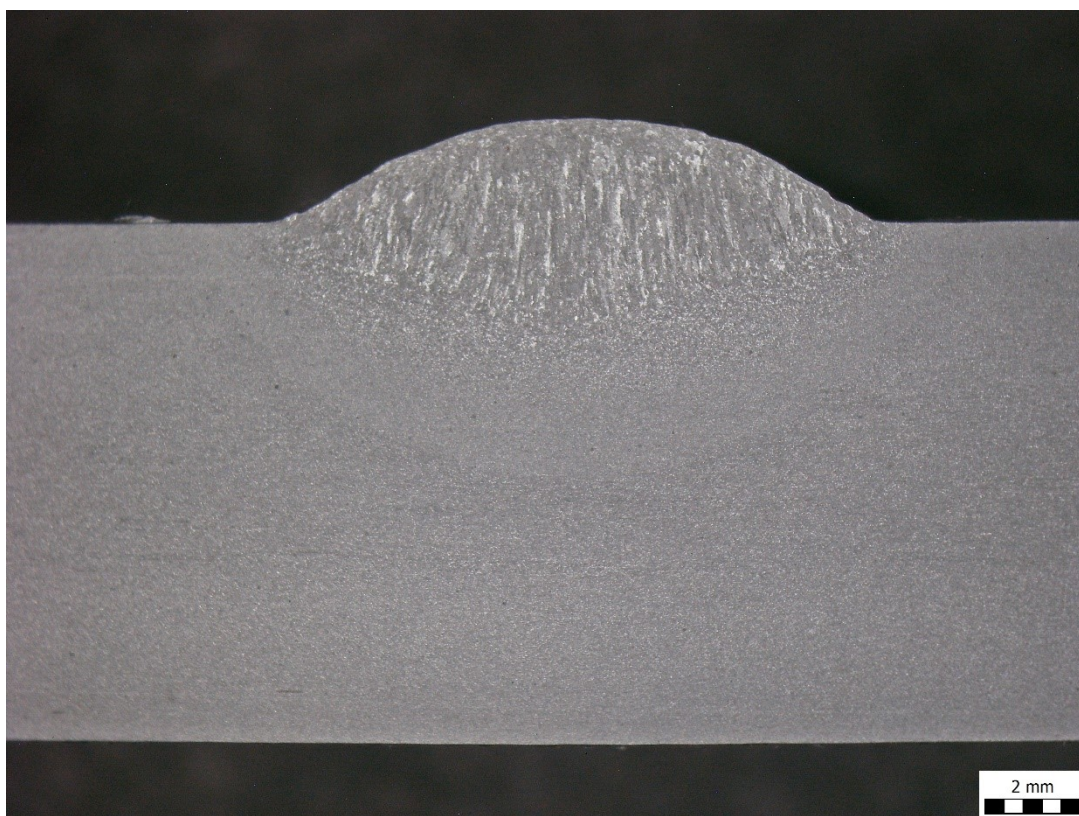
Příloha 10 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 3



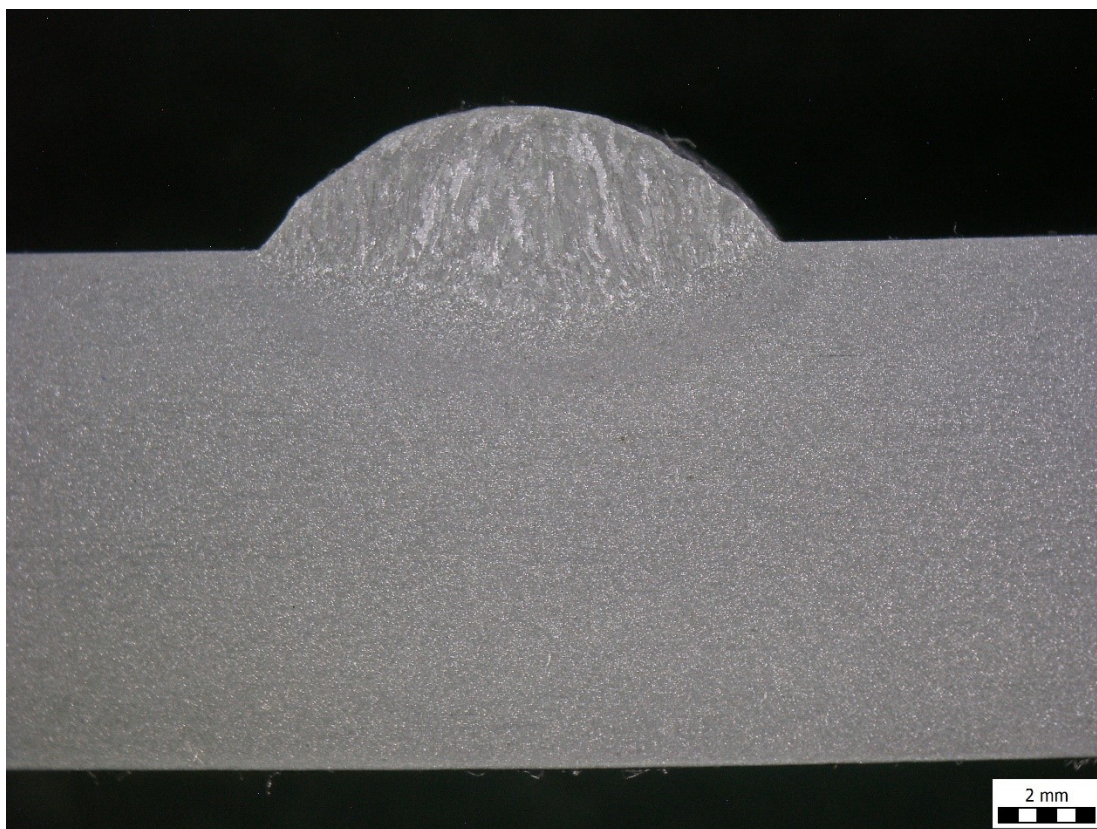
Příloha 9 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 4



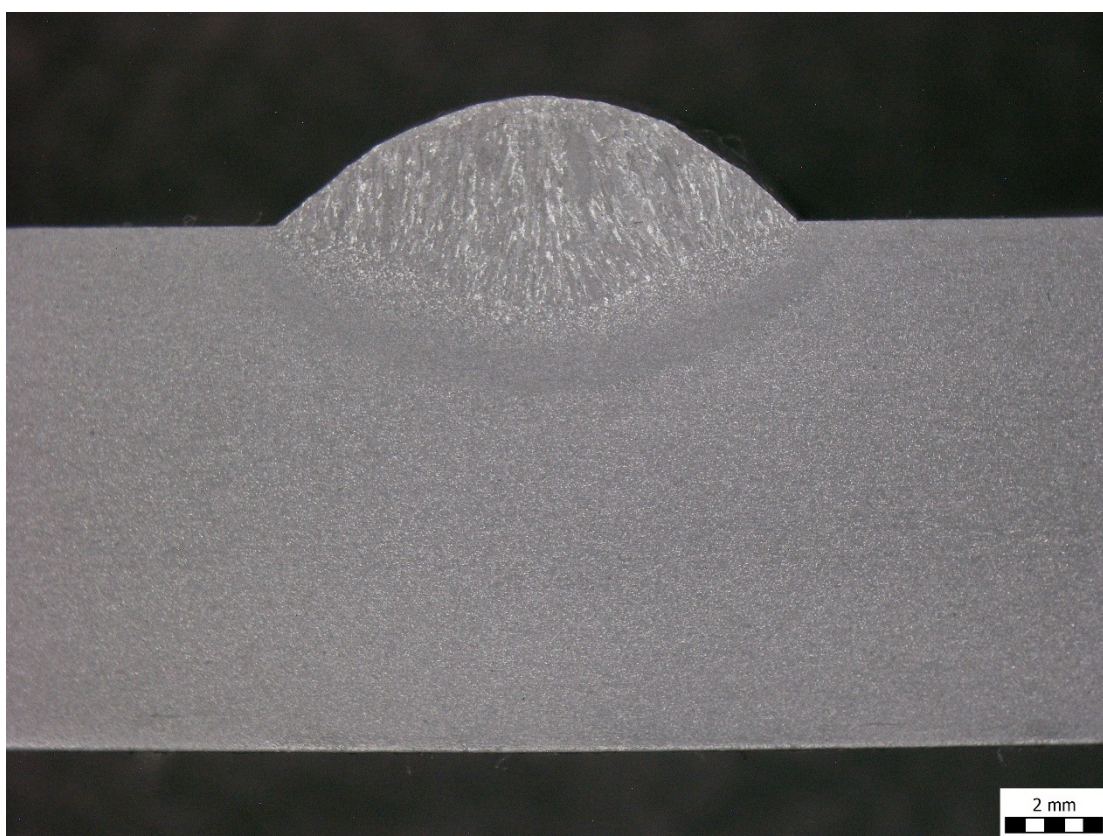
Přiloha 11 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 5



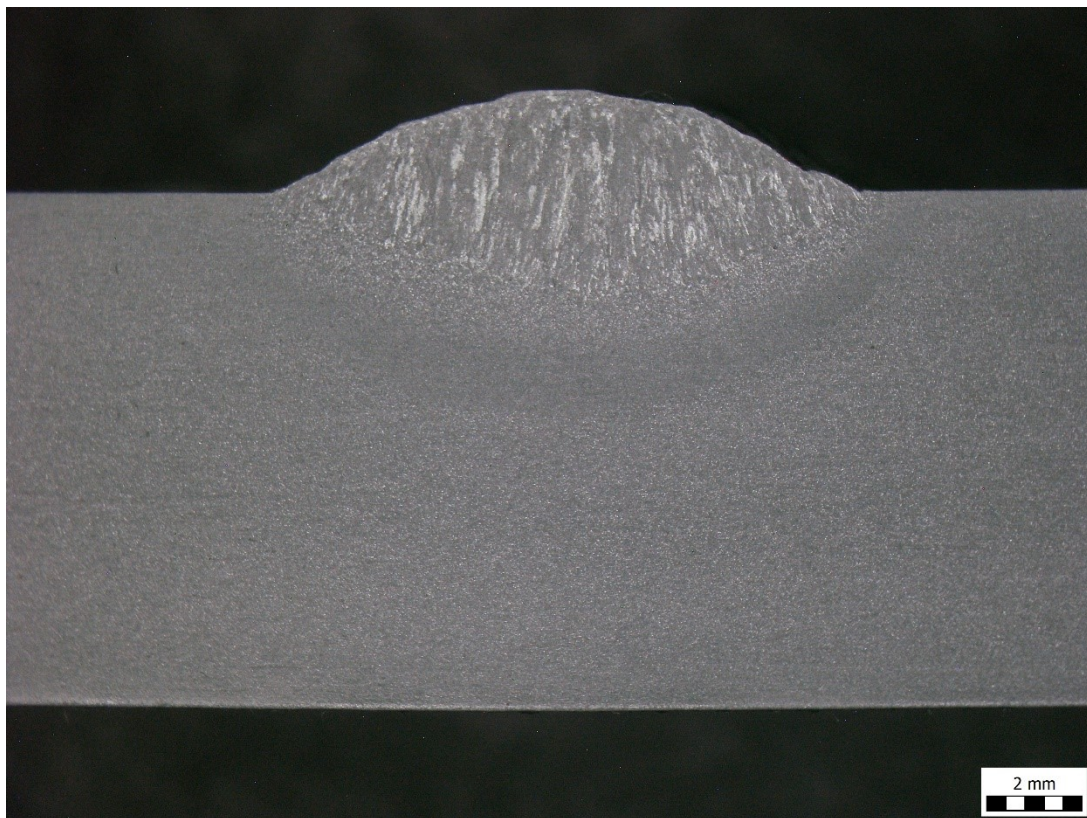
Přiloha 12 - Svařovací metoda 111 - Ø 3,2 mm návar 6



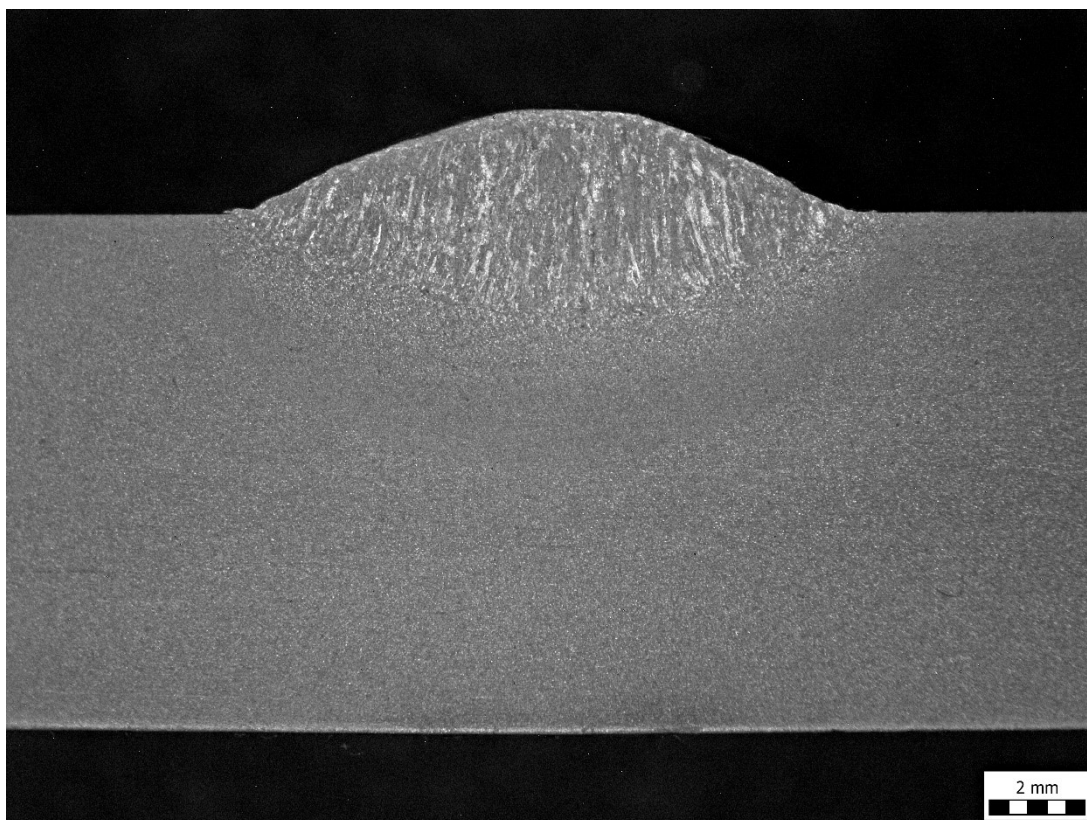
Příloha 13 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 1



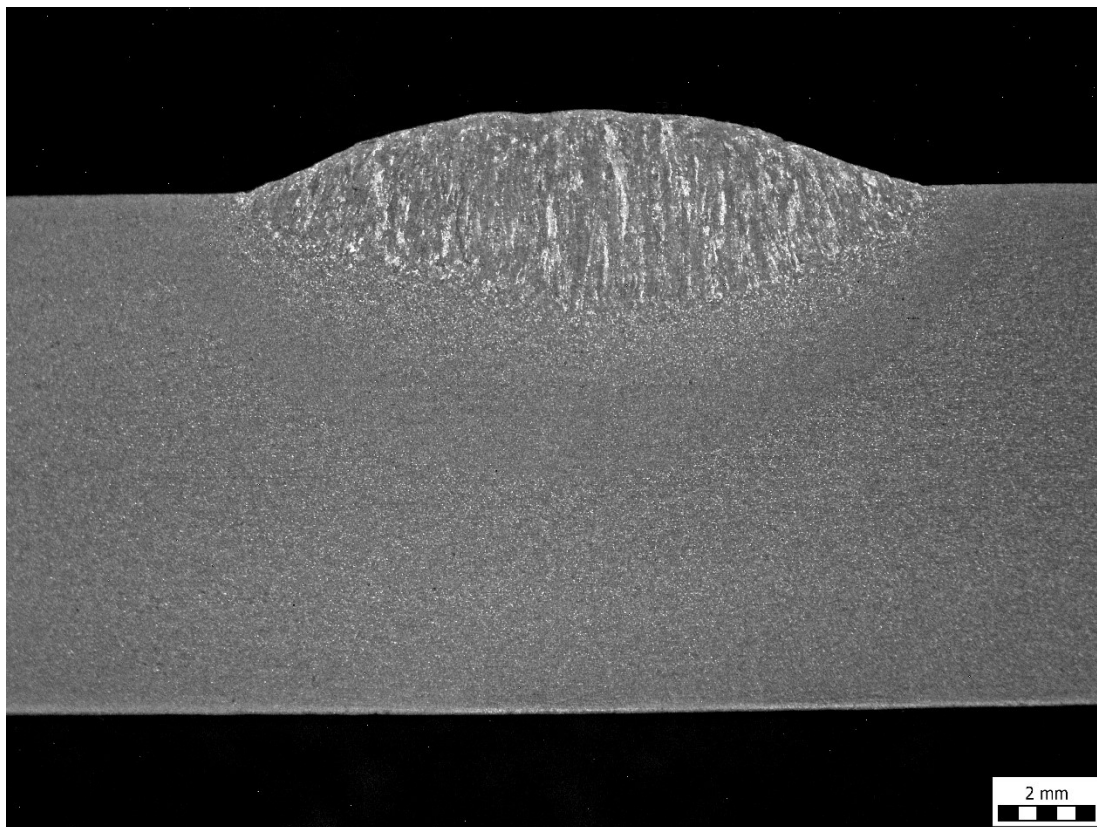
Příloha 14 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 2



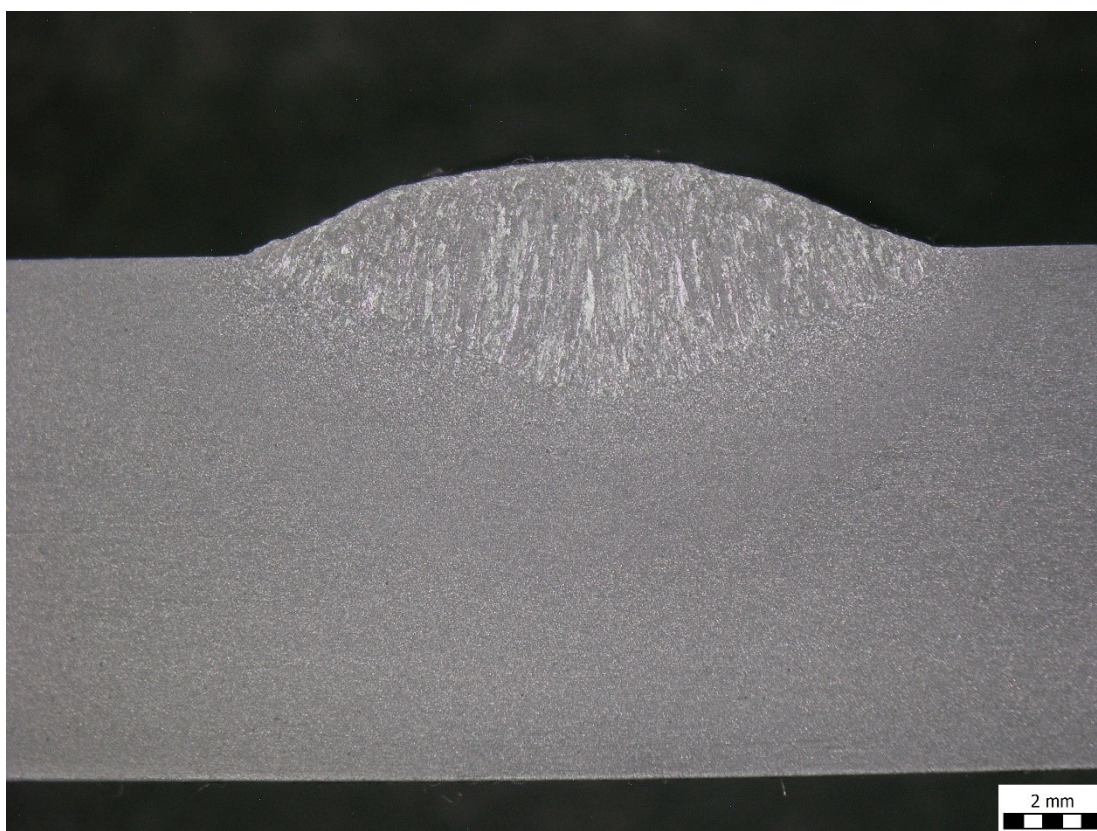
Příloha 15 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 4



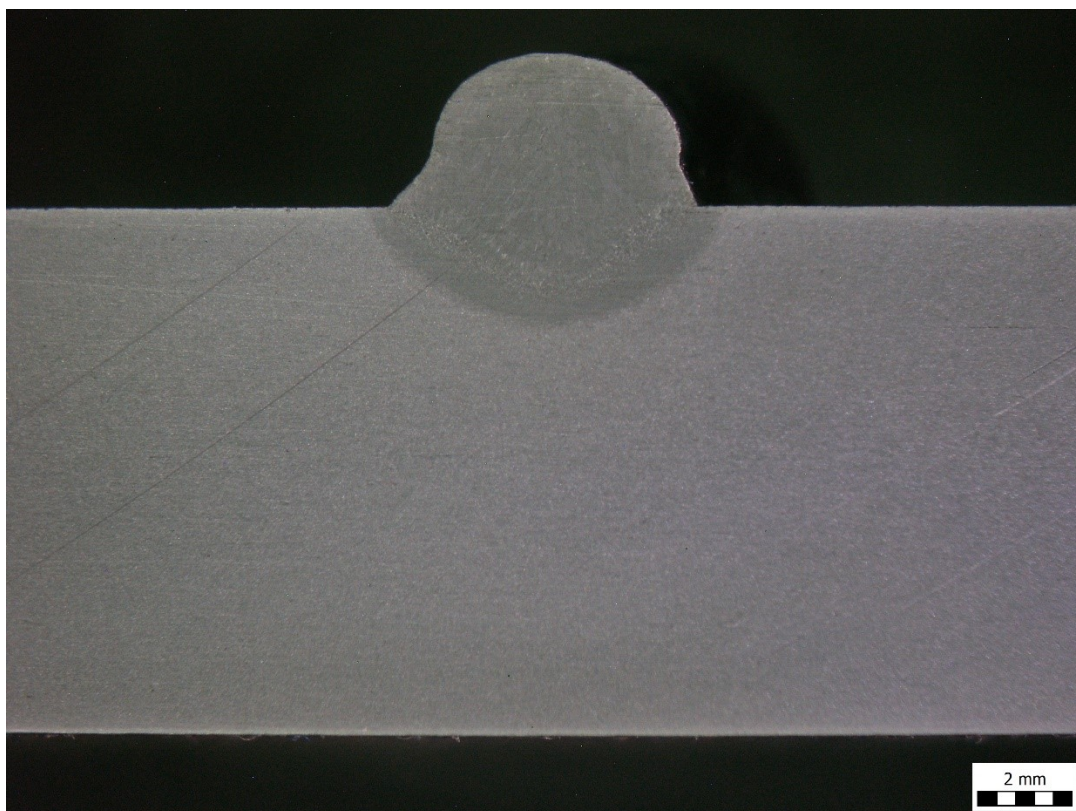
Příloha 16 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 3



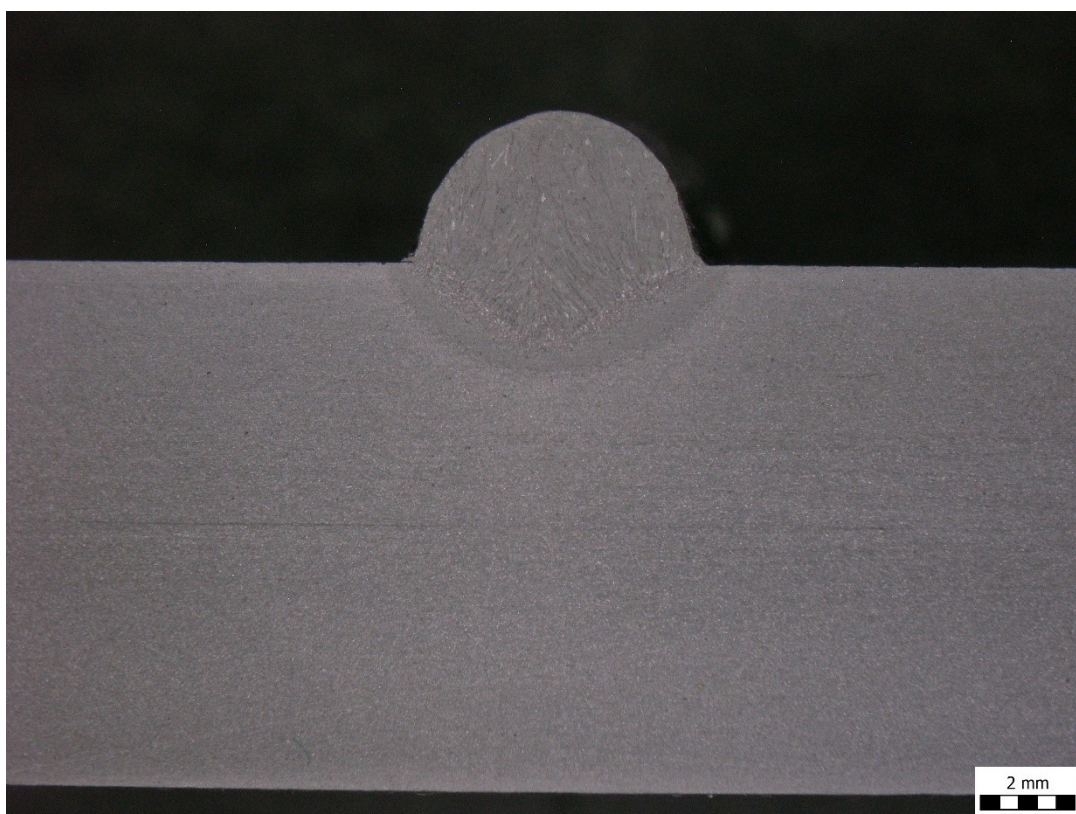
Přiloha 18 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 5



Přiloha 17 - Svařovací metoda 111 - Ø 4 mm návar 6



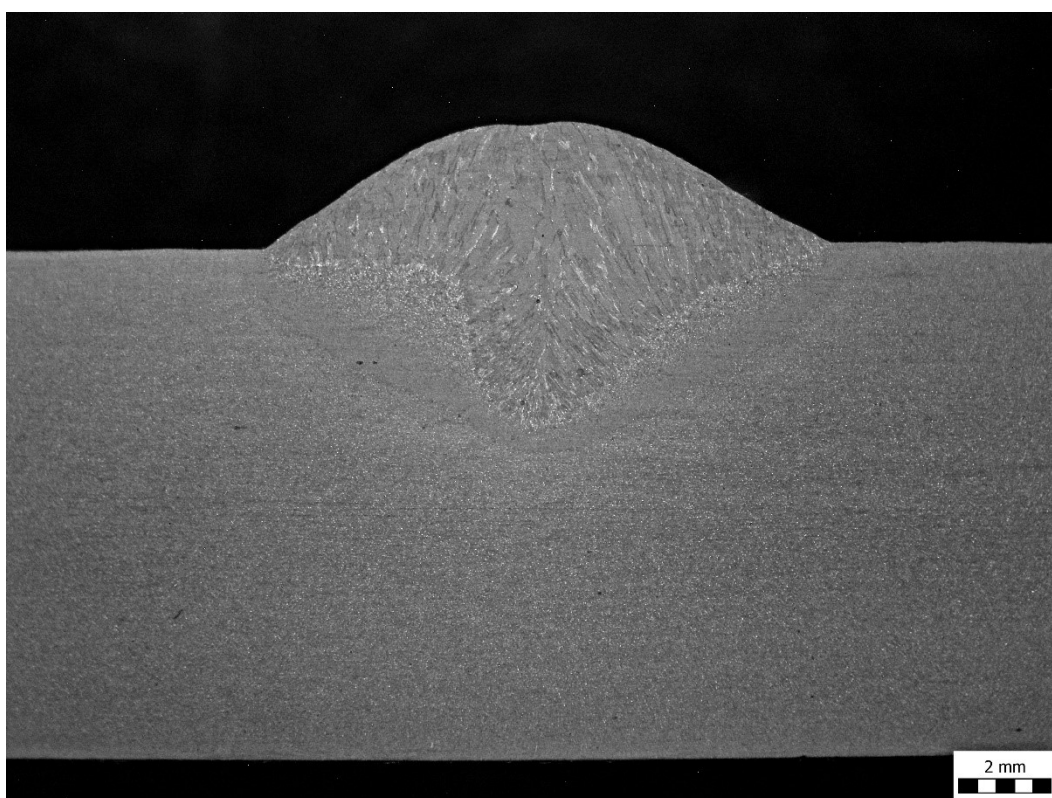
Příloha 19 - Svařovací metoda 135 - návar 1



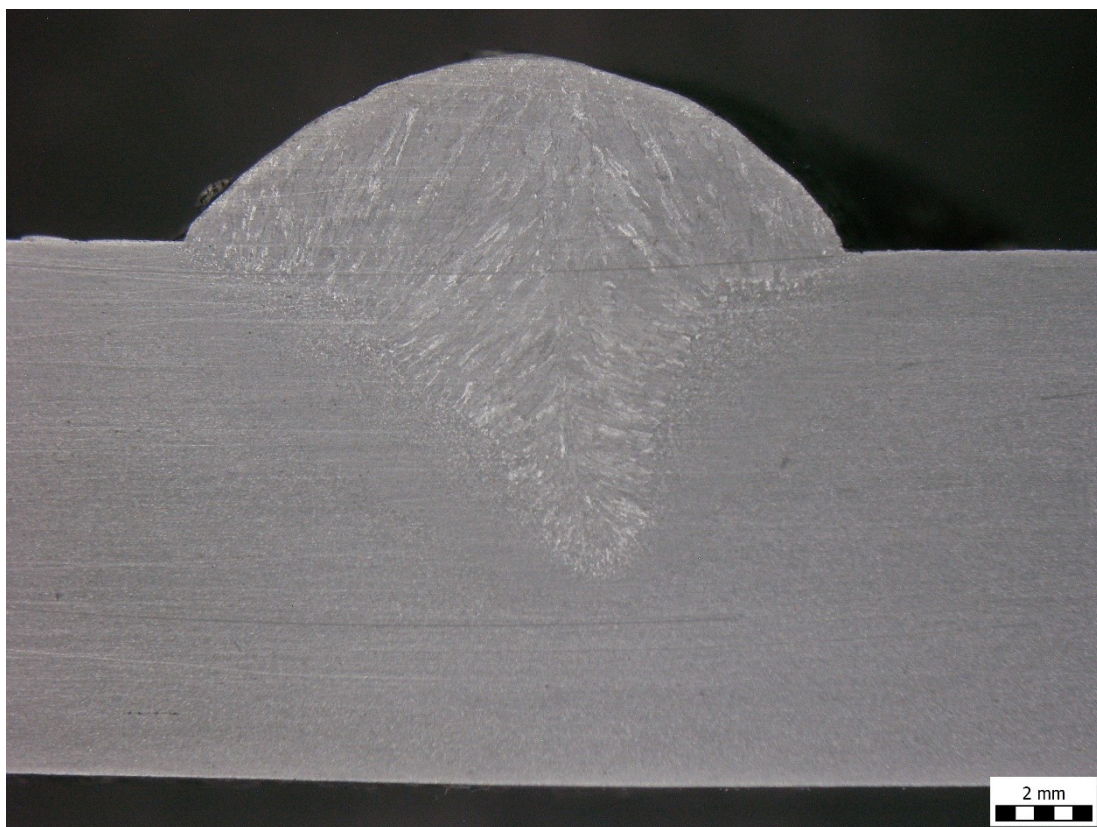
Příloha 20 - Svařovací metoda 135 - návar 2



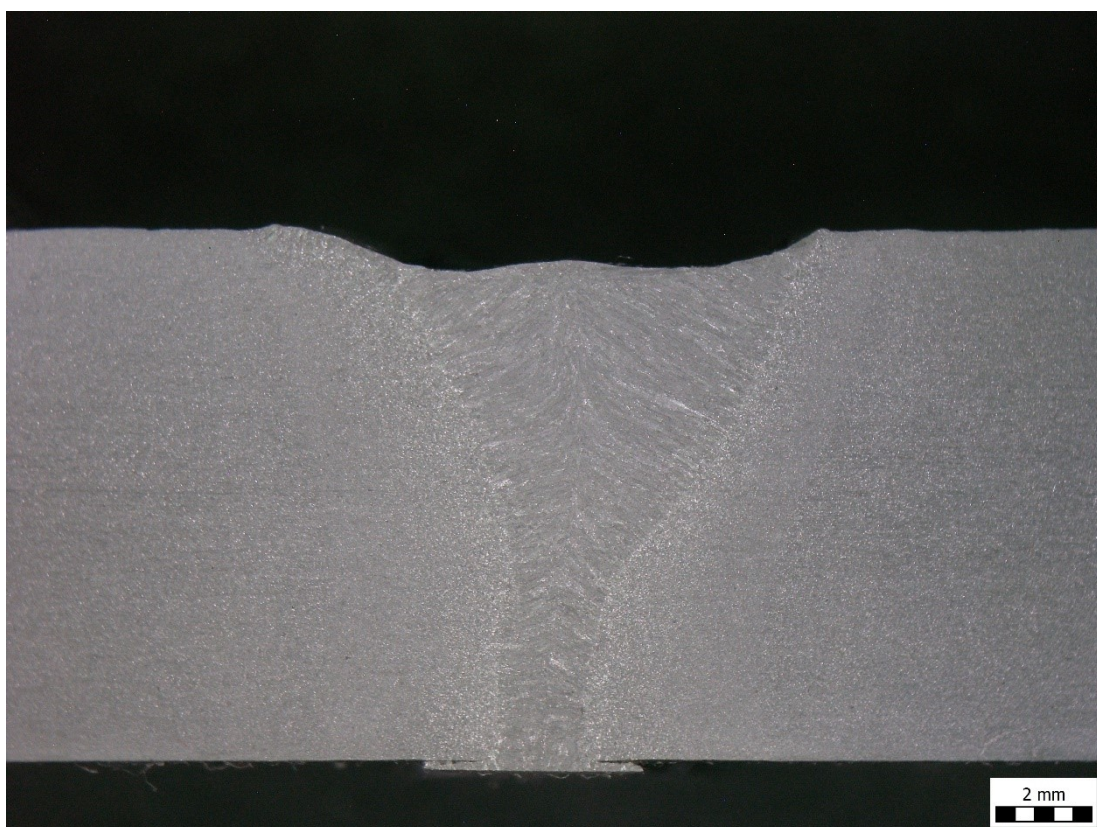
Příloha 22 - Svařovací metoda 135 - návar 3



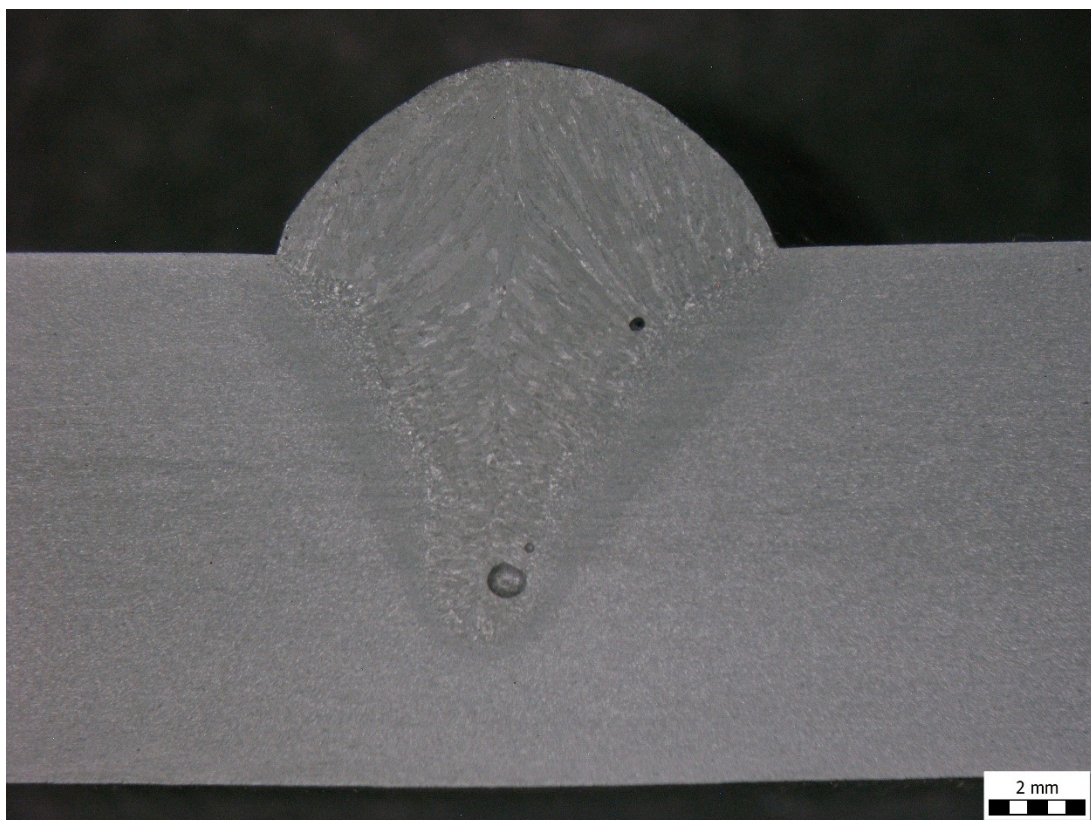
Příloha 21 - Svařovací metoda 135 - návar 4



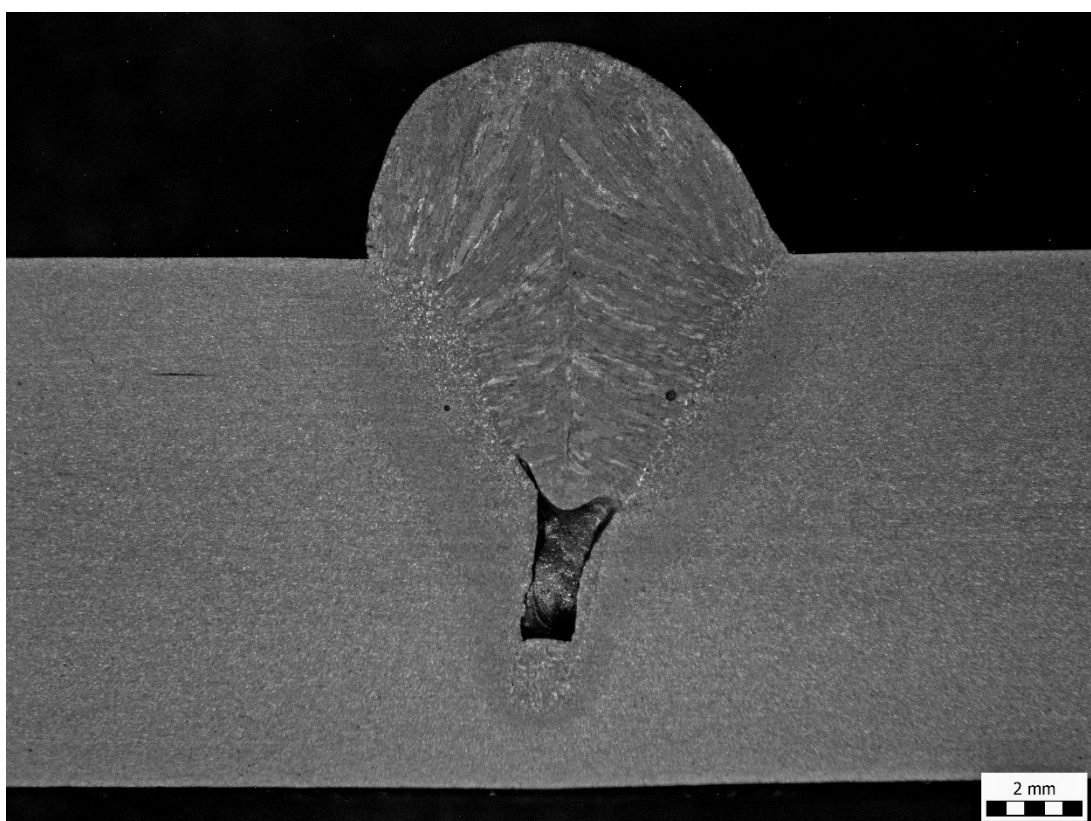
Příloha 23 - Svařovací metoda 135 - návar 7



Příloha 24 - Svařovací metoda 135 - návar 8



Přiloha 26 - Svařovací metoda 135 - návar 9



Přiloha 25 - Svařovací metoda 135 - návar 10



Příloha 27 - Pohled na metodu 111 - Ø 2,5 mm



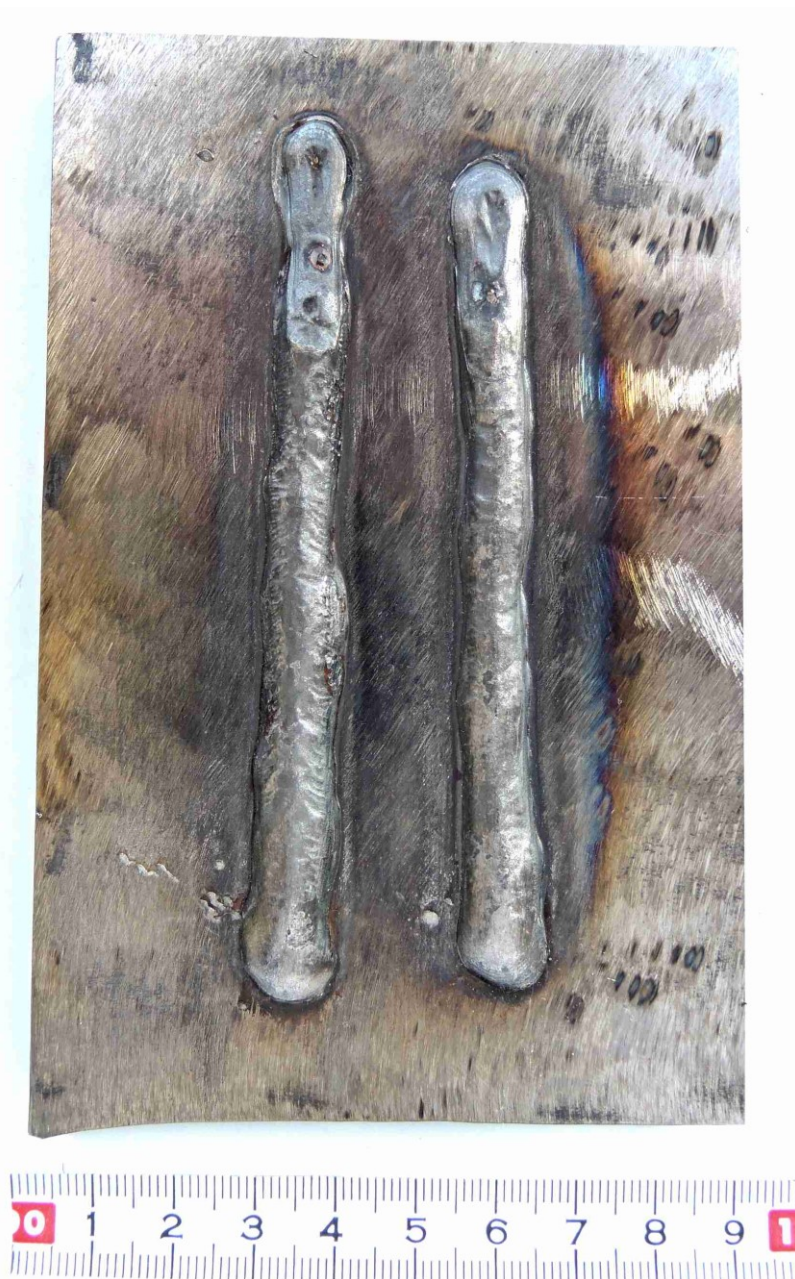
Příloha 28 - Pohled na metodu 111 - Ø 3,2 mm



Příloha 29 - Pohled na metodu 111 - Ø 4 mm



Příloha 30 - Pohled na metodu 135 - část a



Příloha 31 - Pohled na metodu 135 - část b